



GYROSKOOPIT JA MAGNETOMETRIT TYÖKONEESSA

Ville Juven

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2011
Tietotekniikka
Sulautetut järjestelmät
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tampere University of Applied Sciences

Tekijä	Ville Juven
Työn nimi	Gyroskoopit ja magnetometrit työkoneympäristössä
Sivumäärä	46
Päivämäärä	7. toukokuuta 2011
Ohjaava opettaja	Mauri Inha

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli selvittää kahden anturin toiminta ja luoda perusta näiden hyödyntämiselle työkoneissa.

Työssä tutkittiin mahdollisuuksia hyödyntää gyroskooppia ja magnetometriä työkoneympäristössä. Tutkittiin myös näiden näiden yhteistoiminnan suomia mahdollisuuksia.

Gyroskoopilla voidaan mitata koneen suunnan muutosta, ja magnetometrillä voidaan tehdä kompassi. Pelkät anturit eivät ole kovin käytännöllisiä, sillä työkoneympäristö ei ole läheskään häiriötön: työkone tärisee jo tyhjäkäynnillä niin paljon että se näkyy herkissä sensoreissa. Jos molempien antureiden mittaustulokset yhdistetään voi syntyä syntyy uusia mahdollisuuksia hyödyntää anturien lähettämiä tietoja.

Työssä tutkittiin antureiden toimintaa häiriöttömissä ja häiriöllisissä olosuhteissa. Häiriöttömät olosuhteet tarkoittavat laboratorio-olosuhteita ja häiriölliset kaivinkonetta.

Tulokseksi saatiin tietoja antureiden tarkkuudesta ja rajoista, missä ympäristöissä niitä voidaan käyttää, sekä arvioitiin, miten niiden heikkouksia voisi mahdollisesti kompensoida toistensa vahvuuksilla.

Author	Ville Juven
Work label	Gyroscopes and magnetometers in a machine environment
Number of pages	46
Date	7 th of May 2011
Thesis supervisor	Mauri Inha

ABSTRACT

The basic idea of this thesis is to figure out the operation of two different sensors and create a basis for utilizing these in a machine.

The purpose was, to investigate ways to utilize a gyroscope and a magnetometer in a machine environment and the possibility of utilizing these sensors in union with each other and the possibilities of this sensor fusion.

A gyroscope can measure the alteration of direction in a machine, while a magnetometer can be transformed into a compass. The sensors by themselves might not be very useful, because there is a lot of interference in a heavy machine. Combining the data from both sensors can open up new ways to utilize their data.

The sensors were measured in an interference free environment and an environment with interference. The tests were conducted in a laboratory environment, and in an excavator.

The results contain data about the accuracy of the sensors and limits where they can be used and how their weaknesses could be compensated by each others strengths.

Keywords	Thesis, gyroscope, magnetometer, machine
----------	--

ALKUSANAT

Moderneissa työkoneissa on jatkuva tarve saada uusia mittalaitteita sekä uutta mittausdataa koneen käyttäjän saataville.

Työkoneisiin keksitään jatkuvasti uusia mittalaitteita, ja aiheen antanut yritys Novatron OY on alansa johtavia yrityksiä.

Aiheen sain henkilökohtaisesti ottamalla yhteyttä yrityksen edustajaan.

Haluan kiittää yritystä mahdollisuudesta tehdä tutkimusta heille, sekä heidän antamasta avustuksesta ja tuesta.

Haluan myös kiittää yliopettaja Mauri Inhaa yleisesti, sekä vielä erikseen opinnäytetyön ohjaamisesta.

Tampereella 4. toukokuuta 2011.

Ville Juven

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	I
ABSTRACT.....	II
ALKUSANAT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT	V
1. JOHDANTO.....	1
2. GYROSKOOPIT	2
2.1 Perinteiset gyroskoopit	2
2.2 Värähtelevä rakenteinen gyroskooppi	3
2.3 Erilaisia värähtelevä rakenteisia gyroskooppeja.....	4
2.3.1 Pietsoelektrinen gyroskooppi	4
2.3.2 Tuning fork-gyroskooppi eli ”äänirautagyro”	5
2.3.3 Täriseväpyörägyroskooppi	6
2.3.4 ”Wine glass resonator” eli puolipalloresonaattori	6
2.3.5 Lasergyro.....	7
2.4 MEMS-gyroskoopit tarkemmin.....	8
2.4.1 Vanhemmat MEMS-gyrot (äänirauta ja palloresonaattori)	8
2.4.2 Uudet MEMS-gyrot (pietsoelektrinen ja laserympyrägyro)	10
2.5 Työssä käytettävät anturit: LPR430AL ja LY330ALH	13
2.5.1 Termien selityksiä ja lohkokaaviot.....	13
3. MAGNETOMETRIT	15
3.1 Magnetometrit yleisesti	15
3.1.1 Hall-anturi	15
3.1.2 Rotating coil, eli pyöriväkelamagnetometri	16
3.1.3 Flux-gate	16
3.2 MEMS tekniikka magnetometreissa	18
3.3 LSM303DLH Geomagneettinen moduuli	20
3.3.1 LSM303DLH kompassina: suunnittelu ja käyttö	21
4. INEMO DEMOALUSTA	23
4.1 iNEMO Evaluation Board-demoalusta.....	23
4.2 iNEMO: Datan keräys ja lähetys	24
5. ANTUREIDEN TESTAUS JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI.	26
5.1 Mittaukset häiriöttömissä olosuhteissa (laboratorio).....	26
5.2 Mittaukset häiriöllisissä olosuhteissa (kaivinkone)	31
6. YHTEENVETO	44
LÄHTEET	45

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
iNEMO	iNErtial MOdule
IC	Integrated Circuit
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
I/O	Input/Output
PZT	Lyijy-zirkoni-titaani, pietsosähköinen materiaali
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
GPS	Global Positioning System
dps	degrees per second, kulmanopeuden mittayksikkö (asteita sekunnissa)
A/D	Analog/Digital
ADC	Analog/Digital-converter, analogi-digitaali muunnin
DMP	Digital Motion Processing
ARM	Advanced RISC Machine
RISC	Reduced Instruction Set, eli prosessori, jonka käskykanta on työstetty paremman laskentatehon saavuttamiseksi
Firmware	Laitteen sisäinen ohjelmisto
DMA	Direct Memory Access
FreeRTOS	Free Real Time Operating System, eli ilmainen ”Open source” reaaliaikakäyttöjärjestelmä
Open source	Avoin lähdekoodi, ohjelman lähdekoodi on saatavilla jostain ilmaiseksi
GUI	Graphical User Interface
AHRS	Attitude Heading Reference System
.lib	Ohjelmakirjasto. library-tiedostoilla on .lib tiedostopääte. Ohjelmakirjastossa sijaitsevat funktiot eivät ole lähdekoodimuodossa.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus

1. Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on perehtyä MEMS-Gyroskoopin ja magnetometrin toimintaan, sekä miten näitä voidaan hyödyntää työkoneessa erikseen ja yhdessä(fuusio).

Gyroskooppi on laite, jolla voidaan mitata esineen suunnan muutosta. Gyroskooppi pyrkii säilyttämään orientaationsa. MEMS-Gyroskooppi on mikroelektro-mekaaninen laite. MEMS-Gyroskoopeissa on usein sensorit mittaamaan useaa akselia kerrallaan.

Magnetometri on tieteellinen instrumentti, jolla voidaan mitata magneettikentän suuntaa ja voimaa.

Työssä tutustutaan sensoreihin ST-Microelectronicsin iNEMO-kehitysalustan avulla, joka sisältää 2 Gyroskooppianturia ja 6-akselisen geomagneettisen moduulin.

Toinen gyroskoopeista on STMicroelectronicsin LPR430AL, joka mittaa kallistusta (pitch) sekä pyörimistä (roll). Toinen gyroskooppi on saman valmistajan LY330ALH, joka mittaa pystyakselin pyörimistä (yaw).

Magnetometri on puolestaan LSM303DLH, joka on tarkemmin 6-akselinen kiihtyvyysanturi+magnetometri-moduuli. Magnetometrillä voidaan mitata X- Y- ja Z-akselin läpi kulkevaa magneettivuota.

Työssä kerrotaan teoriaa näiden antureiden toiminnasta, sekä esitellään ohimennen myös iNEMO-Evaluation board ja sen käyttämiseen suunnitellut ohjelmistot.

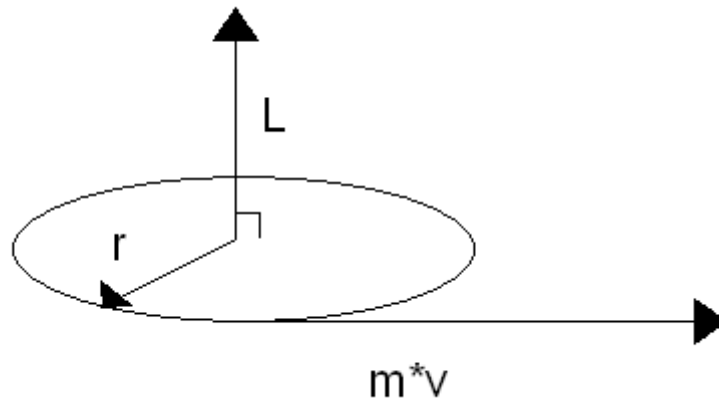
Lopuksi suoritetaan testit häiriöttömissä olosuhteissa (laboratorio) ja työkoneessa (kaivinkone).

Työssä keskitytään antureiden tuomiin mahdollisuuksiin, ongelmiin niiden käytössä, ja ratkaisuihin, millä antureiden ongelmia voidaan korjata.

2. Gyroskoopit

2.1 Perinteiset gyroskoopit /1a,b/

Perinteinen gyroskooppi on mekaaninen laite, yksinkertaistettuna nopeasti pyörivä pyörä joka on ripustettu kardaanisen rengassysteemin sisälle. Sillä voi mitata orientaatiota, ja sen toiminta perustuu pyörimismäärän säilyvyyteen. Pyörimismäärä on aina kohtisuoraan kulmanopeutta vasten.



Kuvio 1. Pyörimismäärä /1/

Pyörimismäärä $L = J\omega$, missä

$J = m \cdot r^2$ on kappaleen hitausmomentti ja ω on kulmanopeus.

Tavallisesti, kun pystytät ison objektin pienen tukipisteen varaan, se pyrkii kaatumaan. Gyroskooppi, jonka pyörällä on pyörimismomentti johonkin suuntaan, pyrkii vastustamaan pyörimismäärän suunnanmuutosta.

Toisinsanoen, kun gyroskoopin hyrrä pyörii jossain tasossa, se pyrkii säilyttämään pyörimismääränsä suunnan kohtisuorassa tätä tasoa kohden. Esimerkkinä kun pystytät yksinkertaisen hyrrän, joka on pyörimisliikkeessä, se pysyy pystyssä, vaikka normaalisti se kaatuisi.

Toinen gyroskoopin ominaisuus on se, että pyörivä pyörä pyrkii säilyttämään tasonsa, vaikka tukirakenne muuttaisi asentoaan. Tätä tekniikkaa käytetään muunmuassa lentokoneissa hahmottamaan lentäjälle lentokoneen orientaatiota maanpinnan suhteen. Kun gyroskooppi laitetaan pyörimään maanpinnan tasossa, pitää se pyörimissuuntansa, vaikka konetta kallistettaisiin. Näin lentäjä tietää kallistumansa maanpintaan nähden.



Kuvio 2. Punainen viiva maanpinnan taso, musta taso kuvaa lentokoneen orientaatiota. /7/

2.2 Värähtelevärakenteinen gyroskooppi /1b,c/

Värähtelevärakenteinen gyroskooppi muistuttaa hyönteisen väristimiä (haltere). Hyönteinen tunnistaa väristimen avulla ruumiinsa orientaation lennon aikana.

Toiminnan taustalla oleva fyysinen periaate on, että värähtelevä esine yleensä pyrkii jatkamaan värähtelyään samalla tasolla, vaikka sen tukirakenne pyörii. Värähtelevärakenteinen gyroskooppi eroaa tavallisesta rengasrakenteisesta gyroskoopista siten, että pyöriminen havaitaan kappaleen liikeyhtälöstä coriolis-näennäisvoimana, kun värähtelevä taso pyörii.

Coriolis-ilmiön voi havaita vapaasti liikkuvan kappaleen radan poikkeamana, kun tilannetta tarkastellaan pyörivästä koordinaatistosta. Ilmiötä voidaan havainnollistaa lisäämällä kappaleen liikeyhtälöön coriolisvoimaksi kutsuttu tasapainottava näennäisvoima.

Näennäisvoima viittaa siihen, että kappaleeseen ei vaikuta varsinaisesti mikään fyysinen voima, vaan radan poikkeama johtuu siitä, että koordinaatisto on kiihtyvässä liikkeessä (pyörii). Värähtelevärakenteiset gyroskoopit tunnistavat pyörimisensä juuri tällaisena näennäisvoimana.

Näennäisvoima voidaan kirjoittaa muotoon:

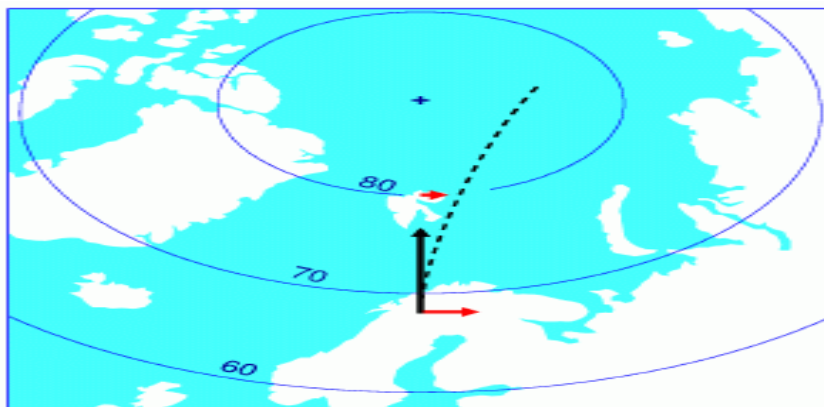
$$\vec{F}_c = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega}), \text{ missä} \quad (1)$$

\vec{F}_c on coriolisvoima, m kappaleen massa ja \vec{v} kappaleen nopeus pyörivän pinnan suhteen ja $\vec{\omega}$ on pyörivän pinnan pyörimisnopeus. \times tarkoittaa vektorien ristituloa.

Näennäisvoiman aiheuttama kiihtyvyys on

$$a_c = 2(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (2)$$

Maapallo on pyörivä taso, ja kaikissa fyysisissä ilmiöissä tulee tämä coriolis-voima ottaa huomioon. Coriolisvoima vaikuttaa lähes kaikkeen mekaaniseen liikkeeseen maapallolla: esimerkiksi ballistinen kappale kaartuu pohjoisnavalla oikealle, ja etelänavalla vasemmalle.



Kuvio 3. Coriolisvoiman vaikutus pohjoisella pallonpuoliskolla ballistiseen kappaleeseen /3/

Teoria värisevän gyroskoopin toiminnassa pohjautuu tämän coriolisvoiman laskemiseen. Otetaan kaksi tunnetun massan omaavaa kappaletta, ja laitetaan ne värisemään samassa tasossa taajuuksella ω_r . Kun muistetaan, että coriolis-ilmiö aikaansaa kiihtyvyyden

$$a_c = 2(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (3)$$

Tunnettujen massojen tason sisäinen nopeus saadaan kaavasta

$X_{taso} \omega_r \cos(\omega_r t)$, missä X_{taso} on kappaleen sijainti tasossa ja ω_r värähtelytaajuus.

Rotaation aikaansaama tason ulkopuolinen liike saadaan kaavasta

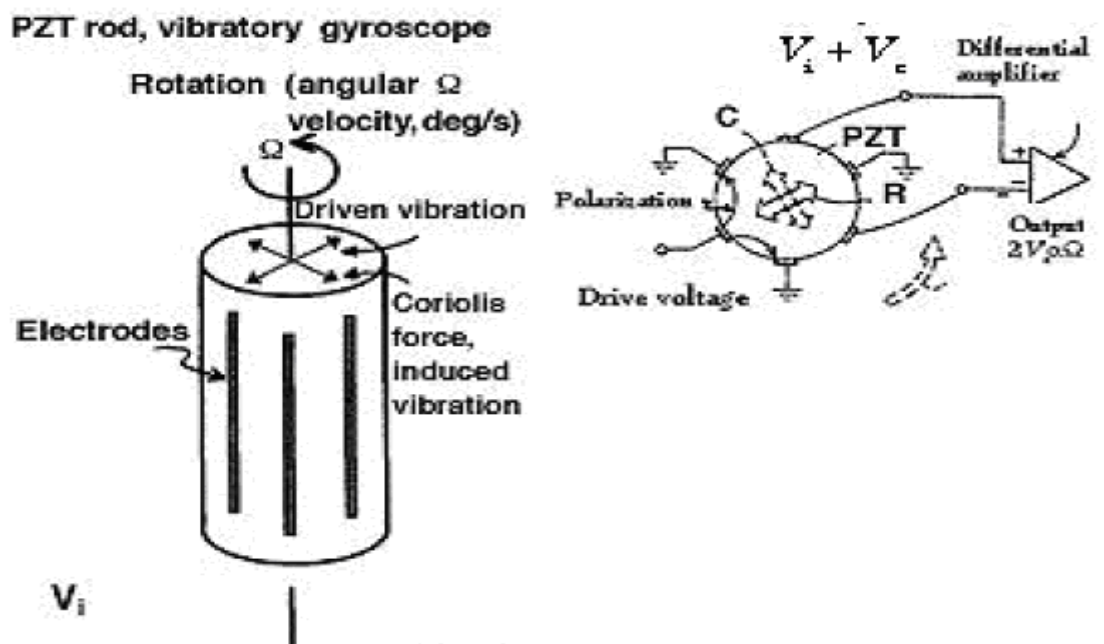
$$y_{op} = \frac{F_c}{k_{op}} = \frac{2m\bar{\omega}X_{taso}\omega_r \cos(\omega_r t)}{k_{op}}, \text{ missä} \quad (4)$$

m on tunnettu massa, k_{op} on tasosta poispäin vievä jousivakio ja $\bar{\omega}$ on rotaatiovektorin suuruus tasossa ja kohtisuora käytettyyn todistetun massan liikkeeseen. Axiaali-symmetrisissä rakenteissa (kuten palkit ja kuoret) coriolis-voima aiheuttaa värinäkuvion vasten pyörimisakselia. Tätä tekniikkaa hyödynnetään muunmuassa tuning fork-tyyppisissä gyroskoopeissa.

2.3 Erilaisia värähtelevärakenteisia gyroskoopeja

2.3.1 Pietsoelektrinen gyroskooppi /1b, 6/

Pietsoelektrinen materiaali voidaan laittaa värisemään, ja Coriolis-voiman aiheuttama sivusuuntainen liike voidaan mitata ja tuottaa signaali, joka on suhteutettu pyörimisliikkeen nopeuteen.



Kuvio 4. Pietsoelektrinen gyroskooppi /6/

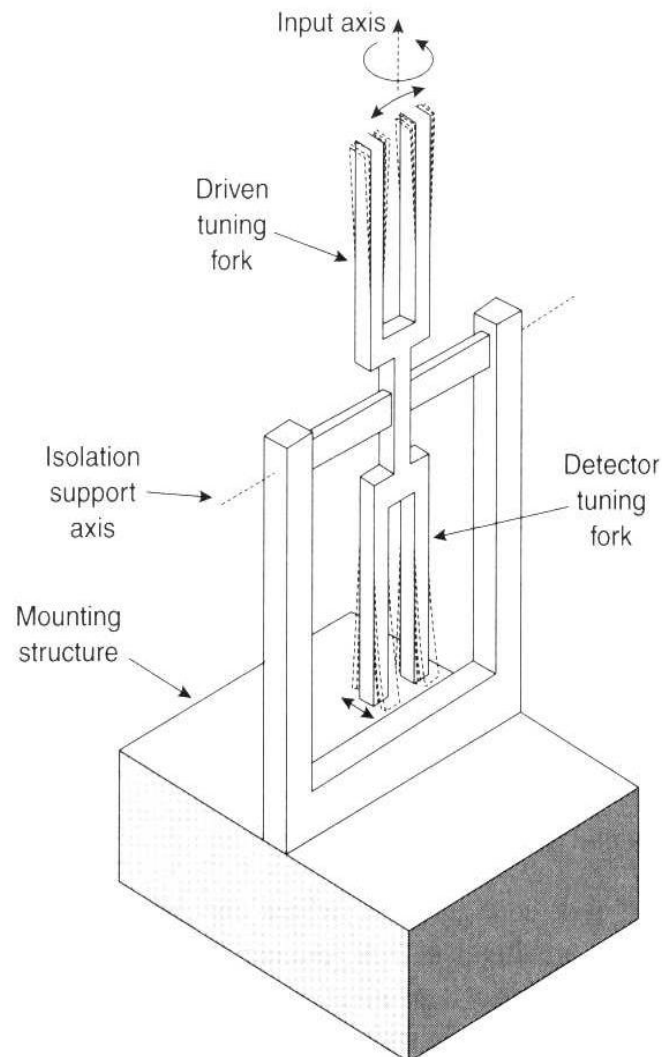
2.3.2 Tuning fork-gyroskooppi eli ”äänirautagyro” /1b, 5/

Kuviossa 5 on esitelty äänirautagyroskoopin toimintaperiaate.

Ylempi haarukka laitetaan resonoimaan sähkövirran avulla. Kun anturia pyöritetään sisäänmenoakselin suuntaisesti, coriolis-voima aiheuttaa edestakaisen liikkeen, joka on kohtisuorassa pakotetun resonoinnin suuntaan ja sisäänmenoakselin suuntaan nähden (alemman haarukan nuolet).

Tätä liikettä voidaan mitata kapasitiivisesti, tuloksena syntyy kulmanopeudella moduloitu signaali, josta kulmanopeus saadaan selville.

Useimmat ja eritoten vanhemmat MEMS-Gyroskoopit perustuvat tuning fork menetelmään. Tuning fork tekniikkaan perustuvissa MEMS-Gyroissa on otettava huomioon resonanssitilat. Sensorilla on kaksi erilaista resonanssitilaa, toinessa tilassa aiheutetaan värinä ja toinen on ulostulon tunnistus. On erityisen tärkeää, että mikään muu lähde ei ole lähellä I/O:den resonanssitaajuuksia.

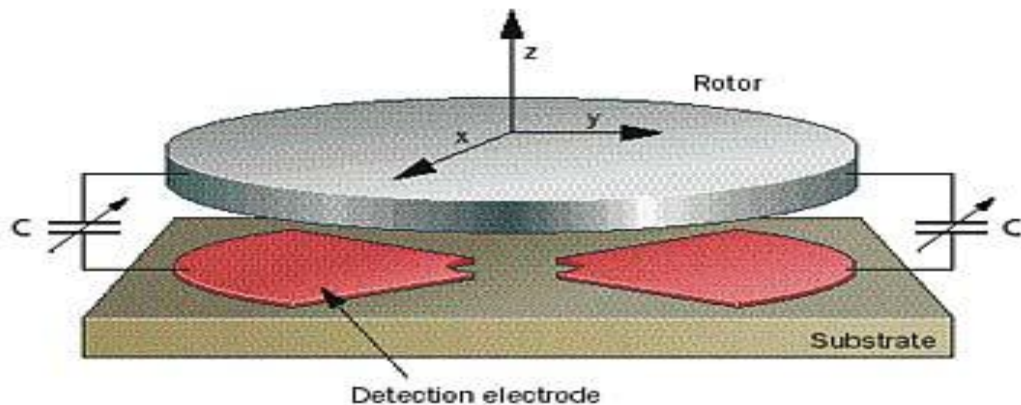


Kuvio 5. Äänirautagyroskooppi /5/

2.3.3 Täriseväpyörägyroskooppi /4/

Täriseväpyörägyroskoopissa pyörä laitetaan täriseeseen symmetria-akselillansa, ja rotaatio mihin tahansa suuntaan tasossa aikaansaa pyörän kallistuman, mikä voidaan havaita kapasitiivisilla elektrodeilla, kuten kuvista 6 nähdään.

Yhdellä pyörivällä pyörällä voidaan havaita pyöriminen kahdella eri akselilla. Tässä tapauksessa gyro tunnistaa X ja Y-suuntaisen rotaation.



Kuvio 6. Täriseväpyörägyroskoopin toimintaperiaate. /4/

2.3.4 “Wine glass resonator” eli puolipalloresonaattori /1b, 8/

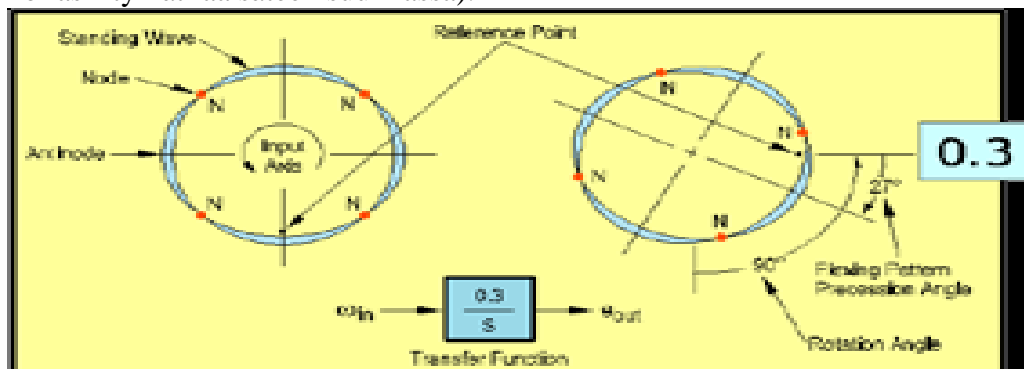
Puolipalloresonaattori hyödyntää viinilasin muotoista puolipalloa, joka laitetaan resonoimaan, ja mittapisteiden eli nodejen sijainti ilmaisee kiertokulman.

Kun puolipalloa pyöritetään, sen muoto muuttuu ympyrästä ellipsiksi, ja nodeilla voidaan tunnistaa puolipallon muodonmuutos ja laskea kiertokulma. Nodet asetetaan puolipallon ympärille tunnistamaan pallon muodonmuutosta.

Puolipallon muoto muuttuu kierroksen aikana seuraavalla tavalla:

- Ensimmäisellä neljänneksellä muoto muuttuu ympyrästä ellipsoidiksi
- Toisella neljänneksellä muoto palaa ympyränmuotoiseksi
- Kolmannella neljänneksellä muoto vääristyy jälleen ellipsoidiksi, sillä erolla, että akselit puolipallon ”päiväntasaajan” suhteen ovat käänteiset.
- Neljännen neljänneskierroksen aikana pallo palaa takaisin omaan muotoonsa.

Täten tärisevä ellipsi muodostaa siten seisovan aallon, jossa on neljä tasaisin välimatkoin sijoitettua antinodea (jotka kuvaavat maksimisiirtymätilaa) ja neljä nodea (jotka kuvaavat nollasiirtymätilaa säteen suunnassa).



Kuvio 7. Puolipalloresonaattorin toimintaperiaate. /8/

2.3.5 Lasergyro /5/

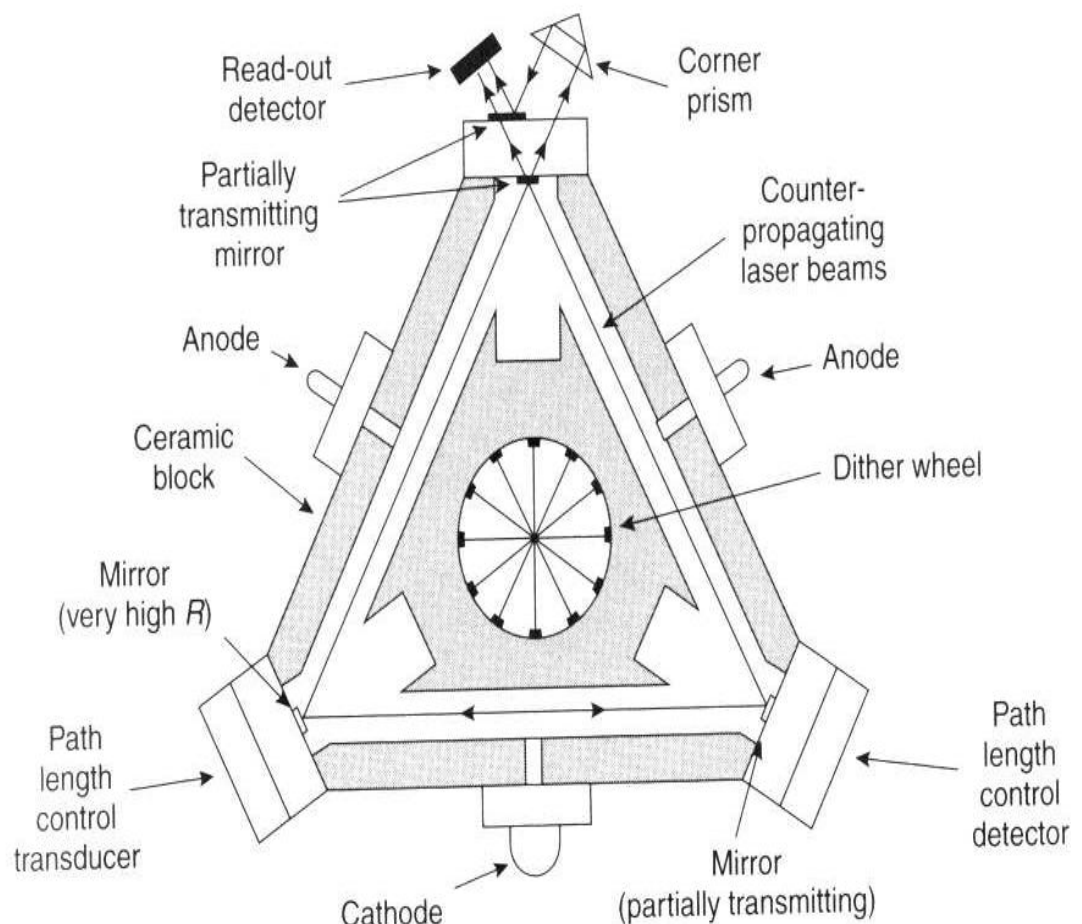
Lasergyroskooppi ei hyödynnä mitään liikkuvia osia, vaan se hyödyntää sähkömagneettista vastinetta mekaaniseen pyörimiseen liittyville ilmiöille. Tätä kutsutaan Sagnac-ilmiöksi, ja sen täydelliseen selittämiseen tarvittaisiin tietoja suhteellisuusteoriasta. Lasergyron toimintaperiaatteen voi selittää yksinkertaistetusti hieman oikaisemalla.

Lähetetään lasersäde matkaan, ja peilien avulla ohjataan säde takaisin lähtöpaikkaansa kulkusuuntaa myötäpäivään. Lisätään toinen lasersäde joka kulkee vastapäivään. Syntyy kaksi seisovaa aaltoa, joiden taajuuseroa mitataan. Kun kotelo pyörii I-koordinaatiston suhteen (laserin reitin määräämän tason ympäri), tämä taajuusero muuttuu. Pyörimissuuntaan kulkeva säde kulkee pitemmän matkan I-koordinaatistossa katsottuna.

Tätä gyroa kutsutaan myös rengaslasergyroksi. Optisella mittaustavalla on useita etuja:

- Erinomainen tarkkuus
- Rajaton sisäänmenokaista
- Ei liikkuvia osia, joten tärinä ei haittaa ja luotettavuus on mekaanisia gyroja äärettömästi parempi
- Lineaarinen kiihtyvyys ei vaikuta mittaukseen

Haittapuolina tässä tekniikassa on kallis hinta, iso koko ja suuri virrankulutus.



Kuvio 8. Lasergyron toimintaperiaate /5/

2.4 MEMS-gyroskoopit tarkemmin /4, 9, 10/

MEMS-tekniikkaan perustuvat ratkaisut ovat miniatyrisointeja isommista mekaanisista mittalaitteista. Tästä johtuen MEMS-gyro on todellisuudessa jokin yksittäinen tai yhdistelmä erilaisista gyro-tyypeistä kiteytettynä erittäin pieneen tilaan.

MEMS-gyrot ovat erittäin edullisia ja uusia sensoreita tulee jatkuvasti markkinoille. Monissa tapauksissa yksittäinen sensori sisältää gyro-anturit useille suunnille. Samassa pakkauksessa saattaa olla myös mukana kiihtyvyysanturi tai magnetometri.

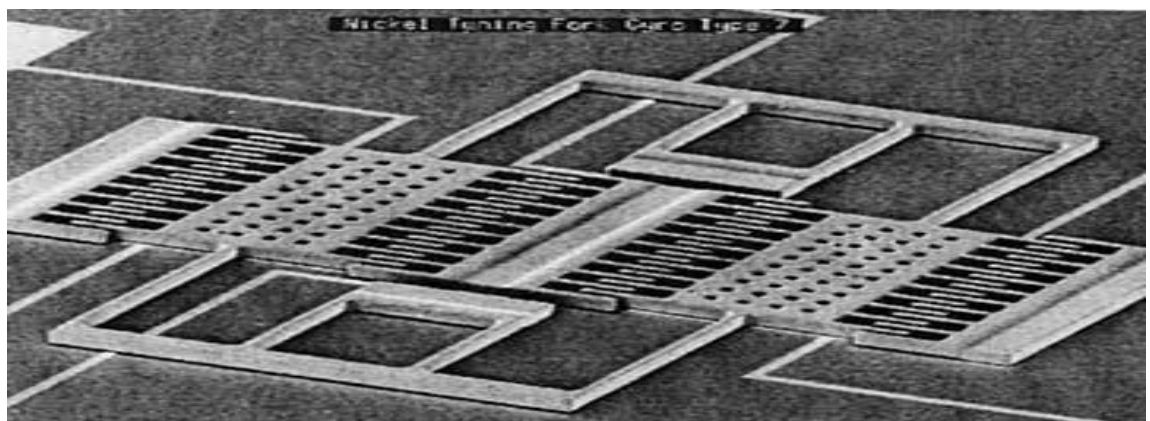
Yleensä IC-koteloidut anturit voivat tarjota joko analogi- tai digitaaliulostulon. Digitaaliulostulo on yleensä sarjaväylä (I2C tai SPI) ja analogiulostulossa on jokin referenssijännite, joka ilmaisee, että anturi on paikallaan ja erot referenssijännitteeseen kertovat kulmanopeuden suuruuden.

2.4.1 Vanhemmat MEMS-gyrot (äänirauta ja palloresonaattori)

Yleisimmät ja vanhimmat MEMS-gyrotyypit ovat äänirautagyro ja palloresonaattori. MEMS-äänirautagyrossa on sisällä 2 haarapiikkiä, joiden välissä on tukipalkki. Oleellista on tietää, että kuten tavallisessa äänirautagyrossa, myös MEMS-tekniikalla toteutetussa äänirautagyrossa on 2 tilaa, toiminta tai ajo-tila ja tunnistustila.

Toimintatilassa nämä piikit laitetaan resonoimaan tietyllä amplitudilla, ja kun systeemiä pyöritetään, coriolisvoima aikaansaa värähtelyn vastakkaissuuntaan toimintatilassa aikaansaadun värähtelyn kanssa. Liike tunnistetaan haarukoiden värinän vaihteluna tai itse tukipalkin liikkeenä.

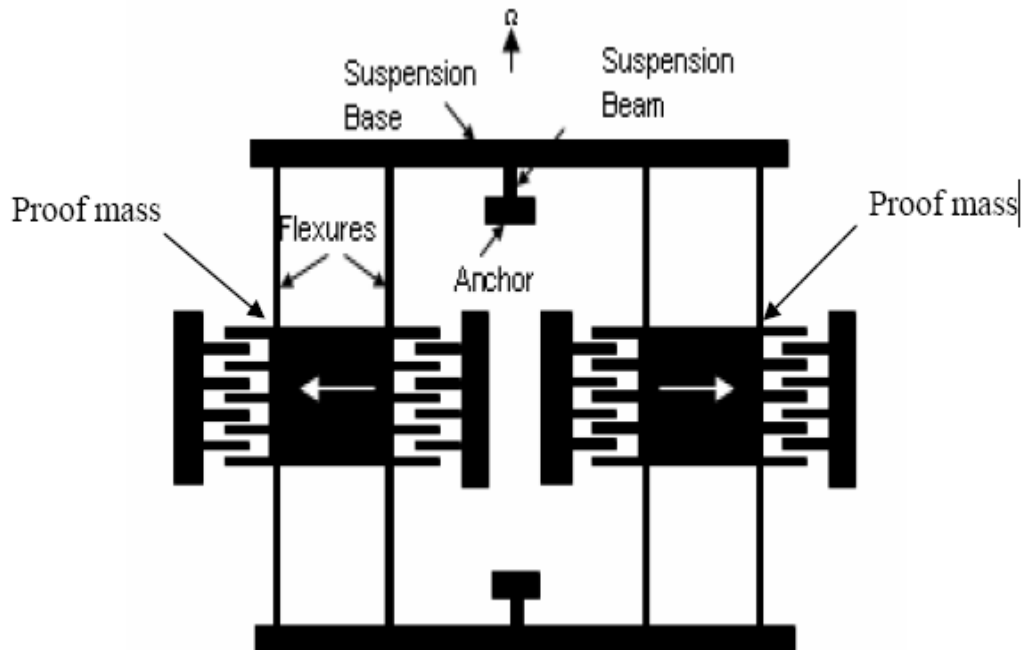
Mekanismi, jolla tärisevää rakennetta ajetaan, voi olla elektrostaattinen, elektromagneettinen tai petsoelektrinen. Liikkeen tunnistamiseen voidaan käyttää kapasitiivista, pietsoresistiivista tai pietsoelektristä tunnistustapaa.



Kuvio 9. Äänirautagyron miniatyrisointi MEMS-laitteeseen. /4/

Kuvion 9 mukainen äänirautagyro tunnistaa liikkeensä kapasitiivisesti ASIC CMOS-piireillä. Kuviossa on esitetty Draper Laboratoriesin vuonna 1991 esittelemä ensimmäinen MEMS-tekniikalla toteutettu äänirautagyroskooppi, joka oli suunnattu autoteollisuudelle ABS-jarruihin.

Kuviossa 10 nähdään periaatekuva kuvion 9 mukaisen äänirautagyron rakenteesta ja toiminnasta.

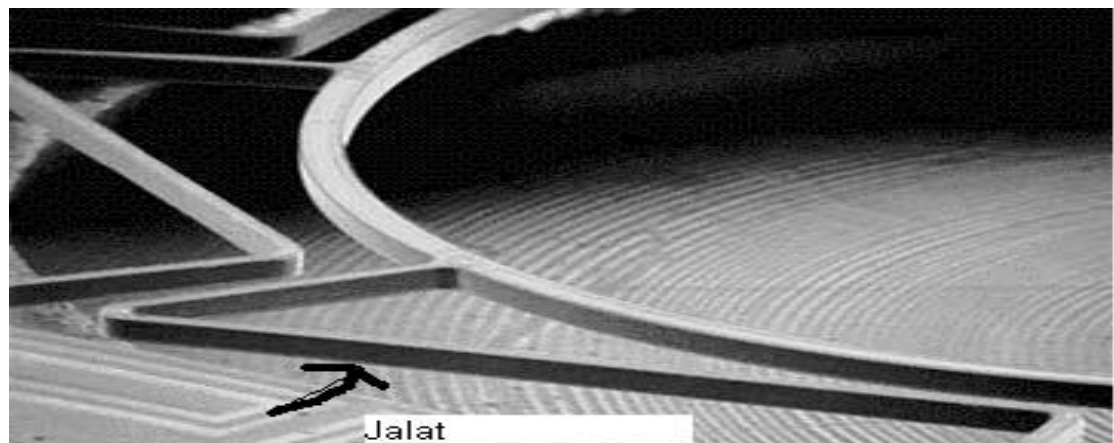


Kuvio 10. MEMS-äänirautagyron rakenne /9/

Kun kuvion 10 mukaisella tavalla rakennettua gyroskooppia pyöritetään, ”proof massit” liikkuvat coriolisvoiman vaikutuksesta. Kun tiedetään Coriolisvoiman suuruus, voidaan kaavasta (1) laskea kulmanopeus.

Palloresonaattorityyppinen MEMS-gyro sisältää kiinteästi sijoitetun magneetin puoliympyrän keskipisteessä. Ympyrä laitetaan resonoimaan virralla, ja coriolisvoiman aikaansaama liike ympyrässä tunnistetaan ympyrän ”jalkoihin” indusoituneena jännitteenä kun ympyrän ”jalat” liikkuvat magneettikentän päältä.

Kuviosta 11 nähdään osa puoliympyrästä ja jalat, joihin indusoitunut jännite kertoo coriolisvoiman suuruuden. Keskellä oleva magneetti ei näy kuvassa.



Kuvio 11. Palloresonaattori-tyyppinen MEMS-Gyro /4/

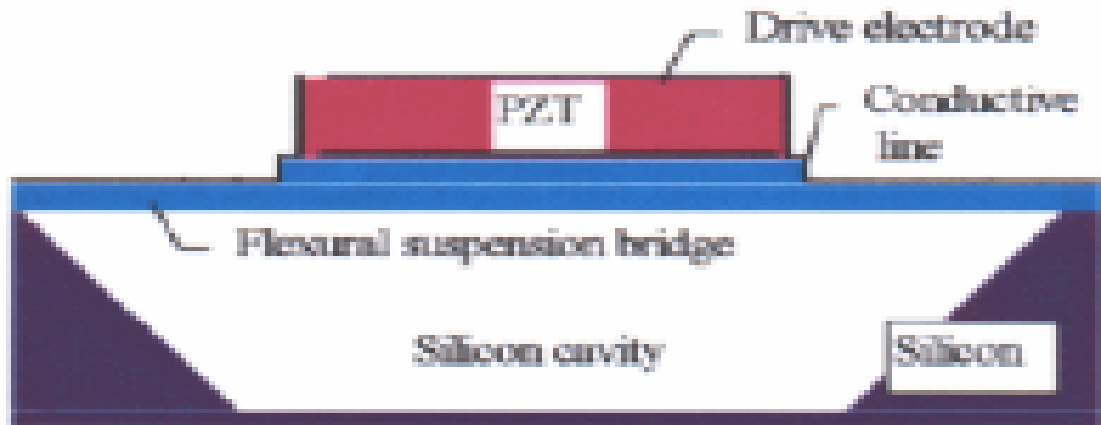
2.4.2 Uudet MEMS-gyrot (pietsoelektrinen ja laserympyrägyro)

Yksi uudentyyppinen MEMS-gyro on pietsoelektrinen gyro. Pietsoelektrinen MEMS-gyro käyttää PZT levyä sen toiminnan pohjana. Tätä tekniikkaa on yritetty käyttää makro-koon laitteissa aiemmin, mutta mikrotason ratkaisuihin tämä tekniikka on varsin ideaalinen.

Kokonainen laatta voidaan valmistaa pietsoelektrisestä materiaalista kerralla. Pietsoelektrisellä MEMS-gyroskoopilla on myös tavalliseen värisevärakenteiseen gyroskooppiin nähden monia etuja, muunmuassa luotettavan mittaustuloksen saamiseen tarvitaan huomattavasti pienempi ohjausjännite.

MEMS-tekniikalla toteutettu pietsoelektrinen laattagyro on hyvin yksinkertainen rakenteeltaan. Itseasiassa, se on huomattavasti yksinkertaisempi, kuin MEMS äänirauta- tai palloresonaattorigyrot.

Pietsoelektrisessä laattagyrossa on hyvin ohut pietsoelektrinen levy, jonka jokaiselle tahkolle on kytketty sähköiset johtimet. Laatta on aseteltu ohuen piilevyn päälle, joka on puolestaan pienen piionkalon päällä. Onkalo antaa PZT laatalle enemmän liikkumavaraa väristä ja muotoutua. Johtimet ovat ohjausjännitettä ja ulostulon mittausta varten. Kuvista 12 nähdään pietsoelektrisen MEMS-gyron poikkileikkauksen.

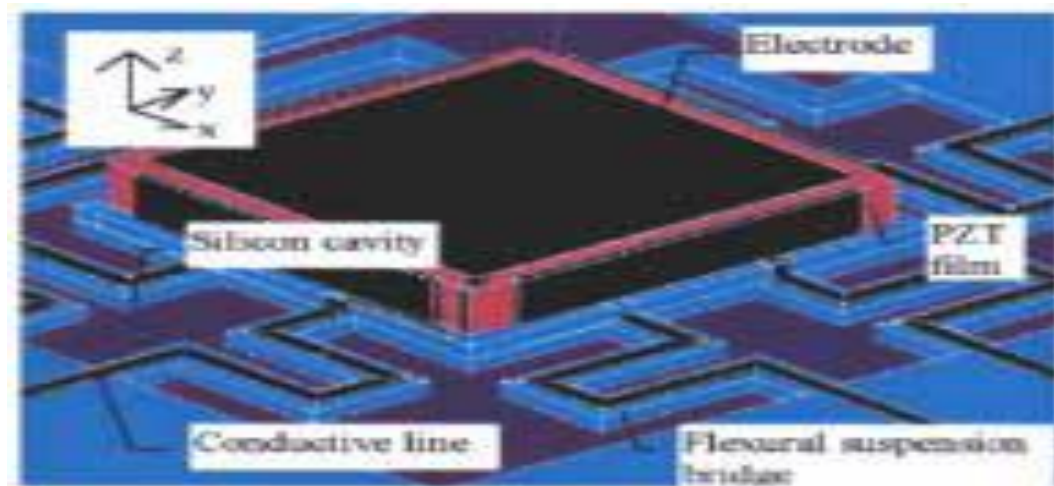


Kuvio 12. Pietsoelektrisen MEMS-gyron poikkileikkaus /10/

Pietsoelektrinen gyro myös toimii tärisävän rakenteen pohjalta. Kun tärisävää PZT-laattaa käännetään kohtisuoraan ohjausjännitettä vasten, aikaansaa se jännitteen kolmanteen kohtisuoraan suuntaan. Tämä jännite on verrannollinen kulmanopeuteen. Kun jännite on tiedossa, kulmanopeus saadaan kaavasta

$$V_{out} \cong \frac{V_A \rho \omega \cos \omega t}{\varepsilon_{11}^T} \frac{a^3}{4c} |d_{31}| d_{15} \Omega, \text{ missä} \quad (5)$$

V_A , on sisäänmeno-jännitteen suuruus, ρ on PZT-materiaalin tiheys, ω on sisäänmenevän jännitteen taajuus, t on aika, a on laatan pituus kohtisuoraan liikkeen suuntaa vasten, c on laatan vahvuus, d_{31} ja d_{15} ovat pietsosähköiset vakiot ε_{11} on aineen permeabiliteetti ja Ω haluttu kulmanopeus. Kuvista 13 nähdään miten tämä tunnistustapa on toteutettu MEMS-piirillä. Taulukosta 1 nähdään vakioiden arvot PZT pietsogyroille.



Kuvio 13. Pietsoelektrinen laatta, jossa ortogonaaliset suunnat ilmaistuna. /10/

Taulukko 1. PZT-tyylisen pietsoelektrisen gyroskoopin suorituskyky ja spesifikaatiot /10/

Specifications		Measuring conditions and performance	
Piezoelectric material	$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$	AC drive voltage V_A	1 V
Density	$7.5 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$	Source frequency	100 kHz
Piezoelectric constant d_{31}	$700 \times 10^{-12} \text{ m/V}$	Lock-in amplifier A_K	10 000
Piezoelectric constant d_{15}	$270 \times 10^{-12} \text{ m/V}$	Thermal sensor noise	$< 1 \times 10^{-3} \text{ V}$
Permittivity $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	3250	Maximum output voltage	5 V
Plate length a	1000 μm	Sensitivity ($A_K V_{out} / V_A / \Omega$)	0.0387 V/V/(deg/sec)
Plate width b	1000 μm	Accuracy	$2.58 \times 10^{-2} \text{ deg/sec}$
Plate thickness c	2 μm	Range	129.2 deg/sec

Pietsoelektrisessä MEMS-gyrossa on myös yksi selkeä haittapuoli, sen tarkkuus. Kun tavallisella äänirauta- tai palloresonaattorigyrolla saadaan aikaan noin 200mikrovoltin herkkyys, pietsoelektronisella saadaan aikaan vain noin 38millivoltin herkkyys. Kulmanopeuksina tämä on karkeasti noin $130^\circ/\text{s}$, kun alkeellisemmatkin äänirauta ja palloresonaattorigyrot pystyvät $300^\circ/\text{sec}$ nopeuksiin.

Toinen heikkous verrattuna vanhempiin MEMS-gyromalleihin on ulostulojännite, kun laite on paikallaan. Vanhemmissa MEMS-gyroissa idle-jännite on huomattavasti lähempänä nollaa, kun taas pietsoelektronisen gyron idle-jännite on vielä noin 100millivoltia.

Yksi suurimmista pietsoelektronisen gyroskoopin vahvuuksista on mitata kahta suuntaa kerralla, ja ohjausjännitteen suuntaa kääntämällä myös kolmatta suuntaa, joskin huomattavasti pienemmällä herkkyydellä.

Tavalliset anturit vaativat 3 gyroskooppia tunnistamaan kaikki suunnat.

Pietsoelektrinen laite on myös helppo integroida muihin IC-piireihin.

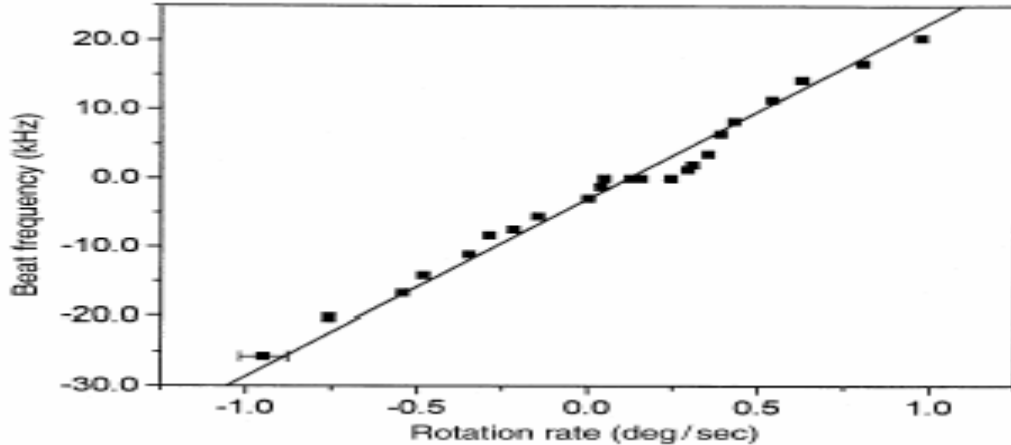
Toinen uudentyyppinen MEMS-gyro on laserympyrägyro. Tämän laserympyrägyron toimintaperiaate on käytännössä sama kuin kappaleessa 2.3.5 esitellyn kolmiomallisen lasergyron toimintaperiaate: lähetetään 2 lasersädettä, joiden taajuus muuttuu laitteen pyöriessä, ja tästä taajuuserosta saadaan laskettua kulmanopeus.

$$\Delta\nu = \frac{4A}{\lambda p} \Omega, \text{ missä} \quad (6)$$

$\Delta\nu$ on vastaanotettujen lasersäteiden nopeuksien (taajuuksien) ero, A ympyrän pinta-ala, λ on laserin aallonpituus ja p ympyrän kehä. Ω on mitattava kulmanopeus.

Lasergyrojen kaksi suurinta virheenaiheuttajaa on vaihteleva ”offset bias” poikkeama ja kuollut alue hyvin pienillä kiertonopeuksilla. Offset bias johtuu kahteen lasersäteeseen kohdistuvista erilaisista taittumisindekseistä, jotka johtuvat hieman erilaisesta saturaatiosta alkuperäisissä säteissä.

Kuollut alue pienillä nopeuksilla johtuu liian pienestä muutoksesta lasersäteiden välisessä nopeudessa. Kun aletaan taajuudet alkavat lähestyä kriittistä arvoa, syntyy ilmiö missä lasereiden taajuudet lähestyvät toisiaan, kunnes ne ovat täysin samat. Tämä antaa tuloksena virheellisen nolla-arvon, vaikka todellisuudessa laitetta pyöritetään hyvin hitaalla nopeudella. Kuvioista 14 nähdään tämän kuolleen alueen ilmentymä kulmanopeuden funktiona.



Kuvio 14. Lasersäteiden taajuusero kulmanopeuden funktiona /10/

Tämä kuollut alue voidaan laskea kaavasta

$$\Omega_L = \frac{r\lambda c}{2A}, \text{ missä} \quad (7)$$

r on materiaalin takaisinsironnan amplitudi, c on valon nopeus, λ on laserin aallonpituus ja A ympyrän pinta-ala.

Suurin ongelma laserympyrägyron toteuttamisessa MEMS-tekniikalla on tekniikan mikro-kokoon skaalaamisessa syntyvät ongelmat.

2.5 Työssä käytettävät anturit: LPR430AL ja LY330ALH /11,12/

Työssä testattavat anturit ovat molemmat ST Microelectronicsin valmistamia antureita: LPR430AL on XY-tason (roll and pitch) anturi ja LY330ALH mittaa Z-tasoa (yaw).

Molemmat anturityypit ovat värähtelevärakenteiseen gyroskooppiin perustuvia analogisia antureita. Molemmat anturit tunnistavat kulmanopeuden coriolisvoimana, joten antureiden taustalla on joko äänirauta- tai palloresonaattori-gyroskooppi.

Antureilla pystytään mittaamaan kulmanopeuksia -3dB kaistanleveydellä 140Hz asti. CMOS IC tarjoaa kulmanopeuden suoraan analogisena ulostulojännitteenä.

Molempien antureiden ominaisuuksiin kuuluu:

- 2.7 – 3.6V käyttöjännite
- Suuri käyttölämpötila-alue (-40°C - +85°C)
- Suuri vakaus käyttölämpötilan suhteen
- Absoluuttinen kulmanopeus analogisena ulostulona
- Integroidut alipäästösuotimet
- Pieni virrankulutus
- Integroitu virrankatkaisuominaisuus
- Integroitu ”Self-Test”-tila.
- Horrostila
- Suuri värinän ja iskujen kestävyys

Antureiden suositellut käyttökohteet ovat:

- Osoitinlaitteet, kauko- ja peliohjaimet
- Liikkeen seuranta käyttöliittymällä
- GPS paikantimet
- Tehdaslaitteet ja robotit

Molemmat anturit kykenevät mittaamaan kulmanopeuksia $\pm 300^\circ/s$ (0,83 mV/°/s LPR430AL) (3,752mV/°/s LY330ALH) nopeudella ja niiden nollatila lepää 1,5V:ssä. Toisinsanoen referenssijännite on aina 1.5V.

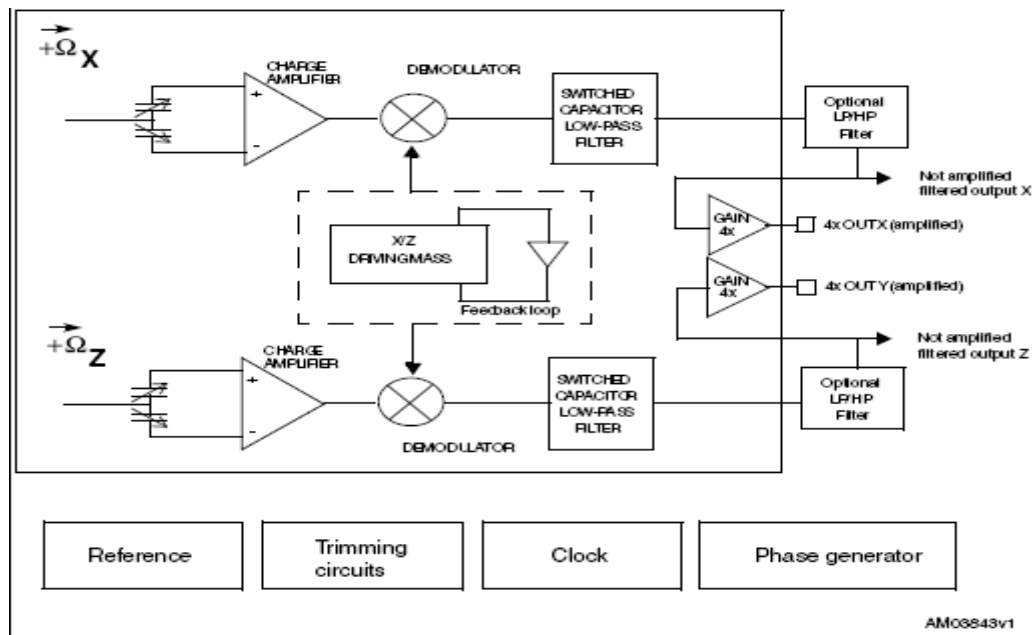
Anturit kestävät kiihtyvyyksiä 3000g 0,5ms ajan ja 10000g 0.1ms ajan.

LPR430AL sisältää kaksi toisistaan erillistä ulostuloa molemmille mitattaville ilmansuunnille, 1x ja 4x vahvistuksella. Vahvistamattomasta 1x linjasta saadaan $\pm 1200^\circ/s$ (3,33mV/°/s) herkkyys.

2.5.1 Termien selityksiä ja lohkokaaviot

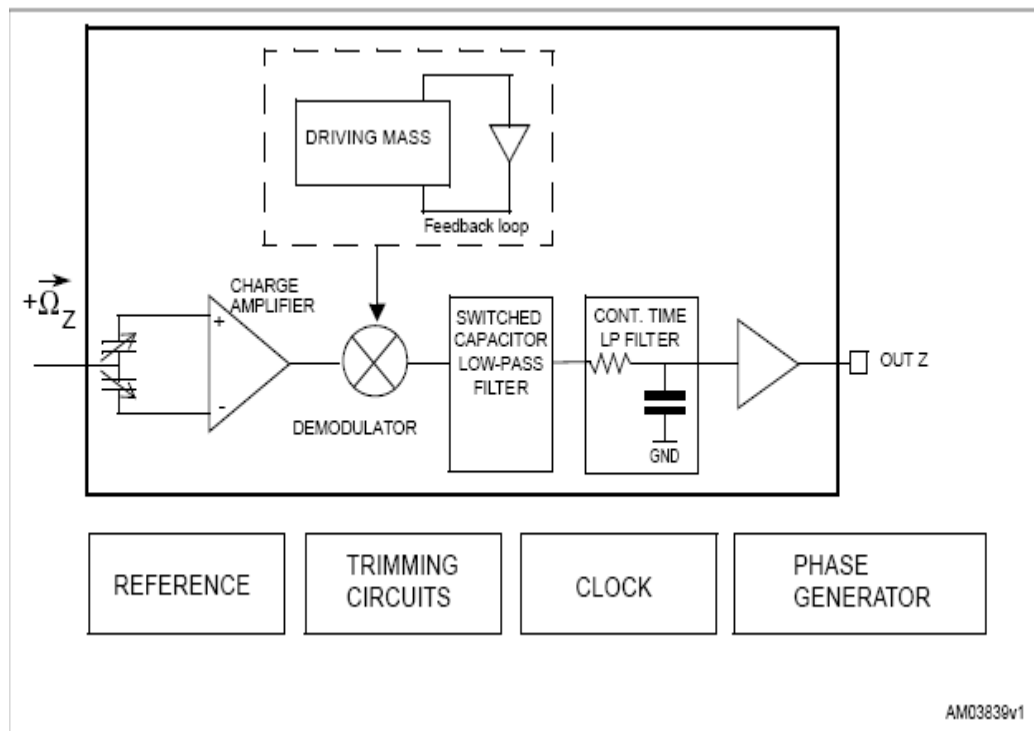
Herkkyys: kun laitteeseen kohdistuu kulmanopeus, mitattavan akselin ulostulojännite muuttuu. Kun laitetta kierretään vastapäivään, aikaansaa se ulostuloon positiivisen jännite-eron referenssijännitteeseen, kun taas kierto myötäpäivään aikaansaa negatiivisen jännite-eron referenssiin.

Nollatilan ulostulojännite ilmaisee ulostulossa näkyvän jännitteen kun laite tuntee olevansa paikallaan. Nollatilajännite riippuu myös anturiin kohdistuvasta rasituksesta, joten esimerkiksi kun anturi juotetaan piirilevyille, saattaa nollatilan jännite muuttua hieman. Samoin ulkoinen mekaaninen rasitus saattaa vaikuttaa nollatilaan.



Kuvio 15. LPR430AL:n lohkokaavio. /11/

Kuviosta 15 nähdään vahvistamaton 1x ulostulo ja vahvistettu 4x ulostulo. Molemmat ulostulot ovat alipäästösuodatettuja ja välissä on myös valinnaisesti päällekytkettävä ylipäästösuodin. Ylipäästösuodin LPR430AL:ssa saadaan päälle kun HP-nastaan asetetaan looginen 1.



Kuvio 16. LY330ALH lohkokaavio. /11/

Kuviosta 16 nähdään, että LY330ALH:ssa on vain yksi alipäästösuodatettu ulostulo.

3. Magnetometrit

3.1 Magnetometrit yleisesti /1c/

Magnetometri on laite, joka mittaa magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa. Isoimmat käyttökohteet ovat geomagneettisen kentän mittaaminen, magneettisen kuvion illustrointi, raakamalmien etsintä, sydän ja aivomagnetismitutkimukset jne.

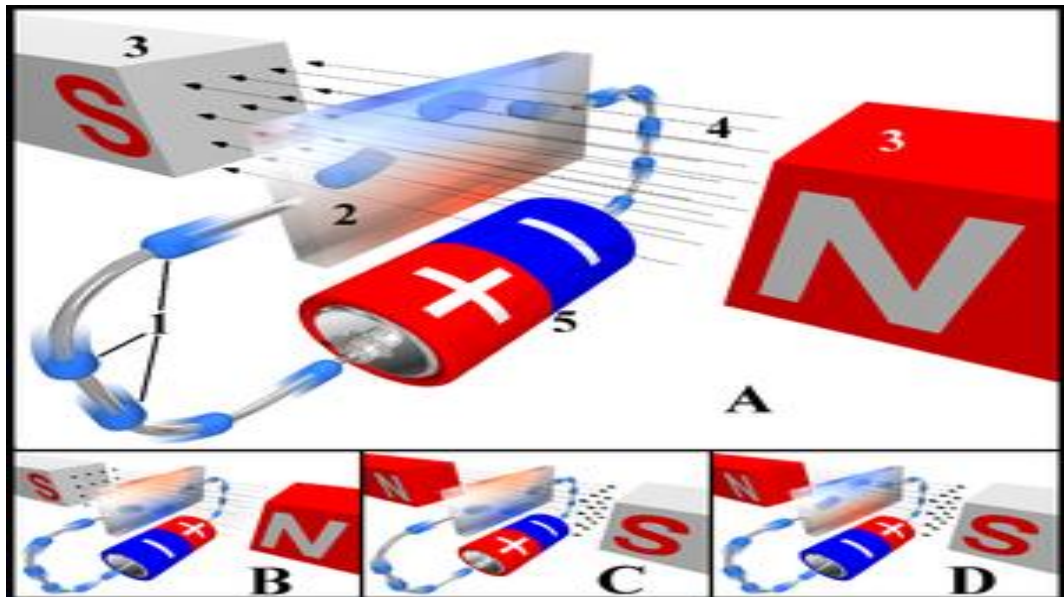
Magnetometreja on kahdenlaisia: skalaarisia, jotka pystyvät vain mittaamaan magneettikentän voimakkuutta, ja vektorityyppisiä, jotka pystyvät myös määrittelemään magneettikentän suunnan mittalaitteen orientaation suhteen.

Magnetometritekniikoita on myös useita, joista merkittävimmät käydään läpi seuraavissa kappaleissa. Yleisimpiä anturityyppejä ovat Hall-anturi ja fluxgate anturi. Anturityyppejä on myös muunlaisia, kuten vahnentunut pyöriväkelamagnetometri.

3.1.1 Hall-anturi /1d/

Yleisin tavallinen magnetometri, on niinsanottu Hall-anturi, jonka toiminta perustuu samannimiseen ilmiöön. Hallin ilmiö on ilmiö, jossa elektroninen kulkusuunta muuttuu, kun johdin, jossa kulkee sähkövirta, tuodaan magneettikenttään kohtisuorassa kenttään nähden. Voima, joka aikaansaa tämän ilmiön on Lozentzin voima. Tämä on voima, jonka sähkömagneettinen kenttä aiheuttaa varattuun hiukkaseen.

Hall-jännite U_H on jännite, joka syntyy kohtisuoraan virran suunnan ja magneettikentän suhteen. Kuvioista 17 selviää, mitä tämä käytännössä tarkoittaa.



Kuvio 17. Hallin ilmiö. /1/

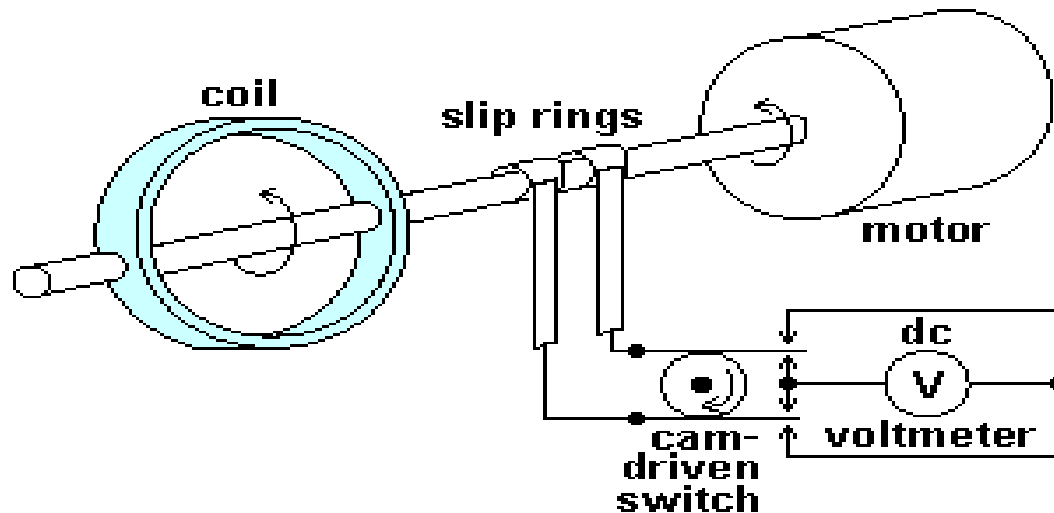
Kuviossa 17 on numeroitu seuraavat asiat:

1. Elektroni
2. Hall-sensori
3. Magneetit
4. Magneettikenttä
5. Virtalähde

3.1.2 Rotating coil, eli pyöriväkelamagnetometri /1d, 14/

Pyöriväkelamagnetometrissa on nimensä mukaisesti kela, jota pyöritetään. Kun magneettivuo läpäisee kelan, siihen indusoituu sinimuotoinen jännite. Siniaallon amplitudi on suoraan verrannollinen magneettikentän voimakkuuteen, olettaen että se on yhtenäinen, sekä pyörimisakselin ja magneettikentän välisen kulman siniin.

Kuviosta 18 nähdään yksinkertaisen pyöriväkelamagnetometrin rakenne.



Kuvio 18. Pyöriväkelamagnetometri /14/

Tähän tekniikkaan perustuvat magnetometrit ovat vanhanaikaisia ja eivät ole enään laajalti käytössä, lähinnä näitä saattaa nähdä koulujen laboratorioissa opetusvälineinä.

3.1.3 Flux-gate /1d, 15/

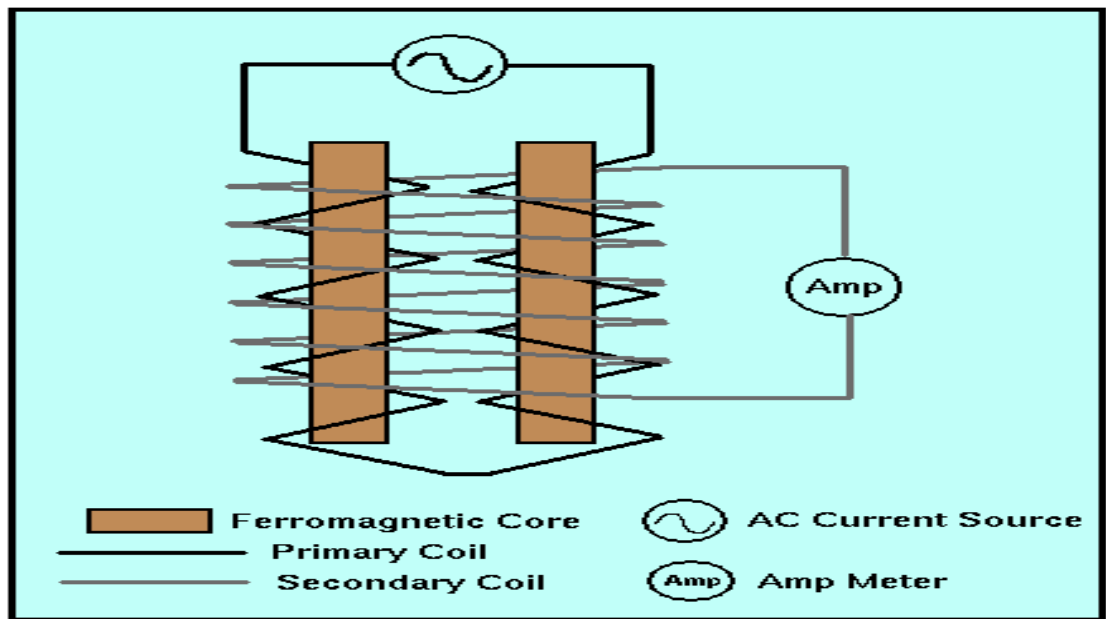
Flux-gate magnetometri keksittiin 1930 luvulla, ja sitä käytettiin toisen maailmansodan aikana matalalla lentävissä lentokoneisissa sukellusveneidenn tunnistusmekanismina. Myöhemmin Flux-gate magnetometrin keksijä, Victor Vacquier todisti mannerlaattojen liikkumisen tutkimalla kyseisillä antureilla muutoksia merenpohjassa esiintyvissä magneettikentissä.

Flux-gateantureita on käytetty myös maan magneettikenttien kartoituksissa, niin ilmasta käsin kuin pienemmillä kannetavilla antureilla.

Nykyisin flux-gateanturia käytetään lähinnä porausreikien mittauksessa, sekä elektronisissa kompassissa ja laboratoriolaitteissa magneettisen remanenssin (kappaleeseen jäänyt magnetisaatio sen jälkeen kun ulkoinen magneettikentän lähde on poistettu) mittaukseen.

Flux-gate magnetometrin toiminta perustuu rakenteeseen nimeltä magneettinen saturaatio-piiri. Kaksi ferromagneettista sauvaa sijoitetaan vierekkäin. Näiden sauvojen herkkyys on oltava tarpeeksi suuri, että maan verrattain heikko magneettikenttä voi tuottaa lähes täyden magneettisen saturaation sauvoihin.

Kuviosta 19 nähdään Flux-gate anturin periaatteellinen rakenne.



Kuvio 19. Flux-gate magnetometrin rakenne /15/

Kummankin sauvan ympärille kiedotaan johdinta, kuitenkin siten että kiertymissuunta sauvoissa on vastakkainen toisiinsa nähden. Johtimiin syötetään vaihtovirtaa, joka aikaansaa suuren keinotekoisen magneettikentän kumpaankin johdinkelaan. Tästä indusoituu samansuuruinen, mutta aina toisiinsa nähden vastakkaissuuntainen magneettikenttä kumpaankin sydämeen.

Jos ytimet eli sauvat ovat ulkoisessa magneettikentässä, yksi ulkoisen magneettikentän komponentti tulee olemaan rinnan yhden ytimen akselin suhteen. Kun virta ensisijaisessa kelassa kasvaa, yhdessä ytimessä syntyvä magneettikenttä on samansuuntainen ulkoisen kentän kanssa, täten ulkoinen kenttä vahvistaa sitä. Toisessa sauvassa syntynyt kenttä on vastakkaissuuntainen ulkoisen kentän kanssa, täten se heikkenee sen vaikutuksesta.

Kenttä saavuttaa saturaation yhdessä sauvassa aina eri aikaan kun toinen sauva saavuttaa saturaation, ja putoaa alle saturaation myös aina eri aikaan toisen sauvan kanssa. Tämä ero synnyttää mitattavan jännitteen toissijaisessa käämissä. Tämä jännite on suoraan verrannollinen ytimien suuntaan kulkevan magneettikentän suuruuteen.

Toissijainen käämi on kiedottu ferromagneettisien sauvojen ja ensisijaisen käämin päälle. Ensisijaisen käämin indusoimat magneettikentät synnyttävät jännitepotentiaalin toisessa käämissä. Kun ulkoista magneettikenttää ei ole (esim. jos maapallolla ei olisi magneettikenttää), jännite toissijaisessa kelassa olisi nolla, koska magneettikentät ytimissä olisivat samansuuruiset, mutta vastakkaissuuntaiset (kumoaisivat toisensa). Kun ulkoinen magneettikenttä on olemassa, ytimien käyttäytyminen vaihtelee riippuen ulkoisesta magneettikentästä.

Täten, flux-gate magnetometri on kyvykäs mittaamaan mitä tahansa komponenttia maan magneettikentästä, yksinkertaisesti mittalaitteen asentoa muuttamalla. Flux-gate magnetometrit kykenevät mittaamaan magneettikenttiä noin 0.5-1.0 nT välillä.

Flux-gate magnetometrin selkeästi vahvimpia puolia on se, että instrumentti ei ala ”seilaamaan” ajan myötä.

3.2 MEMS tekniikka magnetometreissa. /13,16,17/

Kuten muissakin mittalaitteissa, MEMS-versiot antureista ovat miniatyrisointeja suuremmista fyysisistä laitteista. MEMS-teknologialla toteutetuilla magnetometreilla on monia etuja yleensä kookkaisiin tavallisiin magnetometreihin.

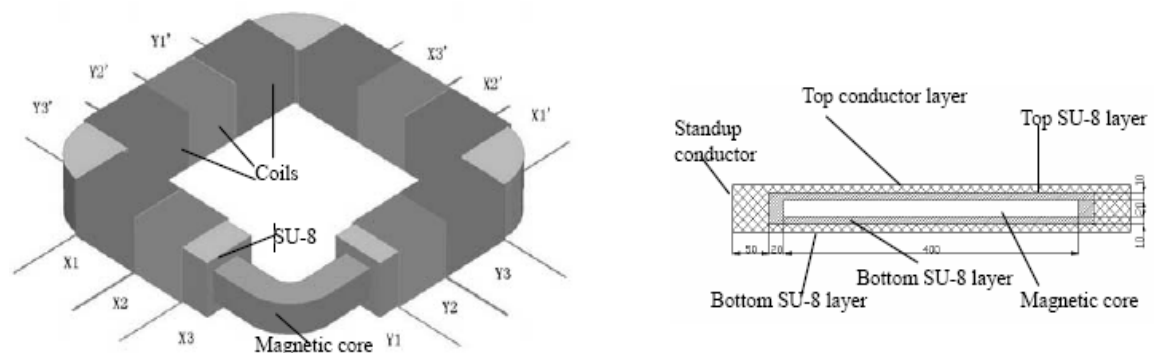
Esimerkiksi lääketieteessä käytettävien laitteiden täytyy olla kooltaan pieniä ja vähävirtaisia, mitä perinteiset magnetometrit eivät missään nimessä ole.

Muita isoja vaikuttajia MEMS-teknikkaan siirtymiselle on perinteisiin antureihin verrattuna merkittävästi pienempi hinta, sekä mahdollisuus massavalmistaa piirejä.

Nykyisellään yleisimmät MEMS-magnetometrit perustuvat Hall-ilmiöön ja flux-gateanturiin.

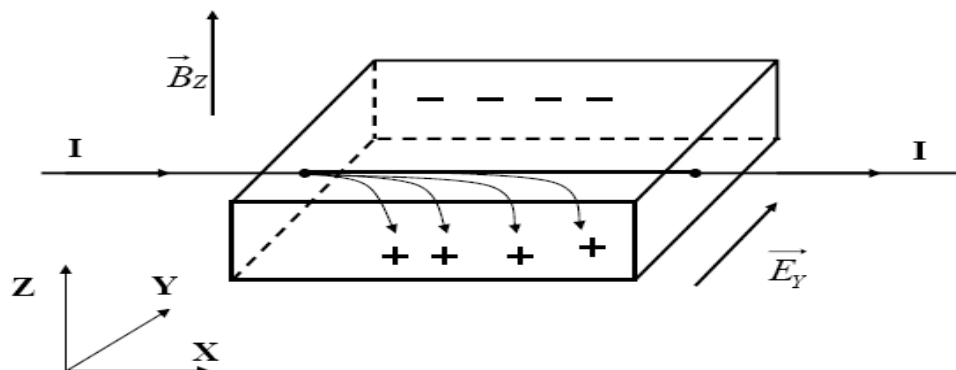
MEMS Flux-gate anturi eroaa hieman rakenteeltaan perinteisestä flux-gate magnetometrissä. Kutakuinkin neliönmuotoisen magneettisen ytimen ympärille on kierretty kaksitoista kelaparia, kolme jokaiselle puolelle: yksi magneettisauvan indusoimiseen, toinen tuloksen mittaamiseen ja kolmas kompensatioon, sekä vastakappaleet toiselle puolelle. Tällä tekniikalla saadaan magnetometri, joka voi mitata X ja Y-suuntaista kenttää.

Kuviosta 20 selviää 2-akselisen anturin rakenne IC-kotelon sisällä.



Kuvio 20. 2-akselisen MEMS flux-coil magnetometrin rakenne /16/

Hallin ilmiöön perustuvat MEMS magnetometrit ovat rakenteeltaan käytännössä identtisiä suurempiin samaan tekniikkaan perustuviin magnetometreihin. P-tyypin puolijohteessa Hall-ilmiötä voidaan hyödyntää puolijohteessa kuvion 21 mukaisesti.



Kuvio 21. Hallin ilmiö puolijohteessa /17/

Kuvion 21 mukaisessa tilanteessa elektromagneettinen voima on

$$F = qE + qv \times B, \text{ missä} \quad (8)$$

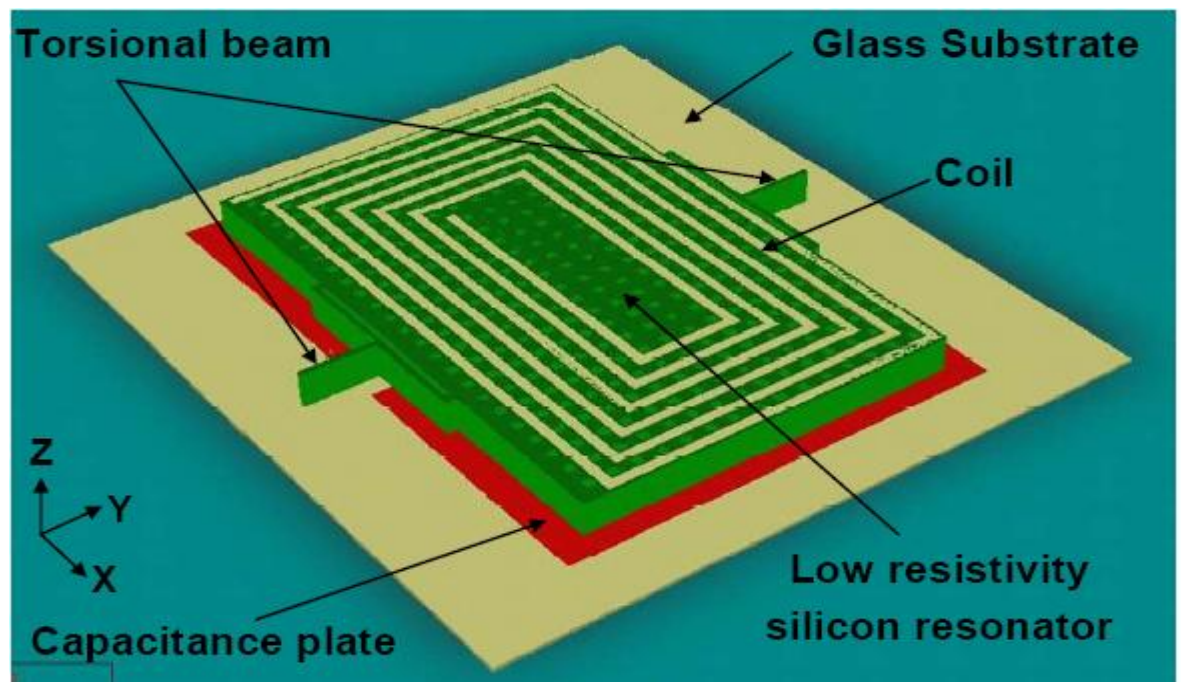
q on alkeisvaraus, E on magneettivuota vasten syntyvä sähkökenttä, v on välitön hiukkasen nopeus ja \times on vektorien ristitulo.

Sähkökenttä P-tyypin puolijohteessa magneettikessä ja tasapainotilassa virralla J_x .

$$E_y = \frac{J_x B_z}{pq}, \text{ missä } p \text{ on aukkojen tiheys puolijohteessa} \quad (9)$$

Kolmas, vuonna 2009 esitelty MEMS magnetometrityyppi on resonanssimagnetometri. Tähän tekniikkaan perustuvia antureita ei ole vielä julkaistu kaupalliseen levitykseen, mutta vaikuttaa lupaavalta ja siksi käydään sitä hieman läpi.

Resonanssimagnetometri perustuu samaan Lorentzin voiman tunnistamisperiaatteeseen kuin perinteiset Hall-anturitkin, sillä erolla että siinä ei ole magneettisia ainesosia ollenkaan. Kuviosta 22. nähdään resonanssimagnetometrin rakenteen mikrokoossa.

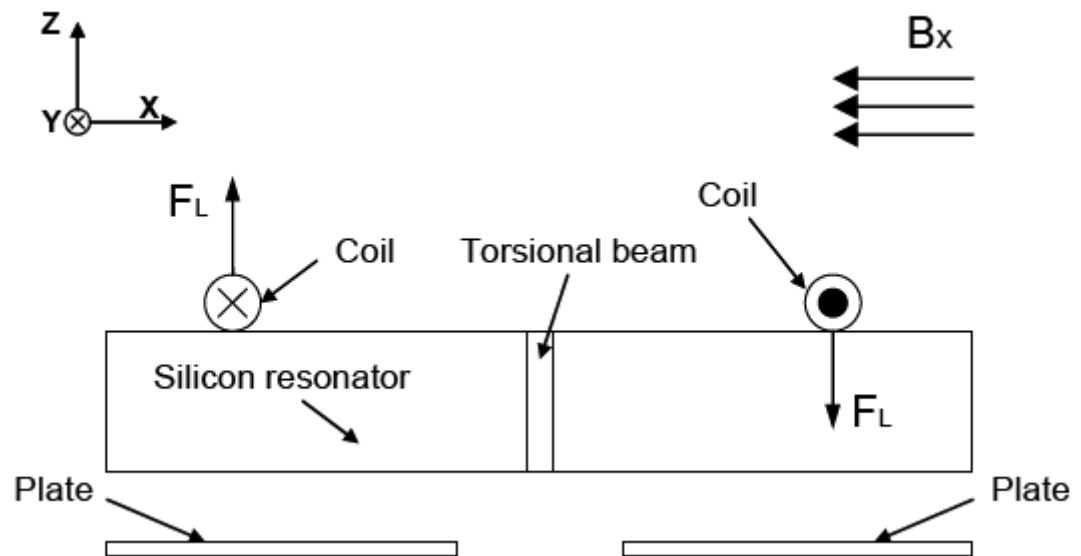


Kuvio 22. Resonanssimagnetometrin rakenne mikrokoossa /13/

Jos käämiin johdetaan tasavirta I , ja jos x -tason suunnassa on magneettikenttä vahvuudelta B_x , piitasoon kohdistuvan kohtisuoran Lorentzin voiman suuruus y -tason suuntaisessa L_c mittaisessa kelassa on;

$$F_L = I \cdot L_c \cdot B_x \quad (10)$$

Lorentzin voima syntyy resonaattorin molemmille puolille, vastakkaissuuntaisena. Täten Lorentz-voimien aikaansaama vääntömomentti on samansuuntainen, mikä taivuttaa vääntöpalkkeja (Torsional beams). Tämä siirtymä havaitaan kapasitiivisesti, mikä kertoo suoraan magneettikentän suuruuden. Kuviosta 23 selviää miten tämä tapahtuu.



Kuvio 23. Torsional beamien siirtymän havaitseminen kapasitiivisesti. /13/

Tarkemmin, kapasitiivisten levyjen (Plate) kapasitanssin ero kertoo magneettikentän (Lorentzin voiman F_L) suuruuden.

3.3 LSM303DLH Geomagneettinen moduuli /18/

Moduuli sisältää 3-akselisen magnetometrin sekä 3-akselisen kiihtyvyysanturin. Anturi on digitaalinen ja sen ulostulot ovat sarjamuotoisia (I2C). Anturi on MEMS-tekniikalla suunniteltu anturi, jonka magneettikenttää mittaava puoli on toteutettu joko Hall-anturilla tai Flux-gatella. Myöhemmistä mittauksista selviää anturin tyyppi. Magnetometri ja kiihtyvyysanturi voidaan kytkeä päälle/pois erikseen, ja toisen toiminta ei vaadi sitä, että toinenkin anturi on päällä.

Moduulin ominaisuuksiin kuuluu mm.

- Analoginen käyttöjännite väliltä 2.5-3.3V
- Digitaalisen puolen erillinen 1.8V käyttöjännite
- Magneettikentän ilmaisun herkkyys $\pm 1.3 - \pm 8,1$ Gaussin asteikolla
- $\pm 2 \text{ g}/\pm 4 \text{ g}/\pm 8 \text{ g}$ Dynaamisesti vaihdettava kiihtyvyyden herkkyys

Moduulia voidaan käyttää esimerkiksi:

- Asentokompensoituna kompassina
- Asennnon/orientation tunnistamiseen
- Liike-aktivoituihin mekanismeihin
- Vapaapudotuksen tunnistamiseen
- Jne

Digitaalinen I2C-väylä voi toimia joko 100kHz tai 400kHz (High Speed) nopeudella. Koska kaikki tieto tulee digitaalisena, viestien tarkoitukset pitää etsiä erikseen laitteen datalehdeltä /18/

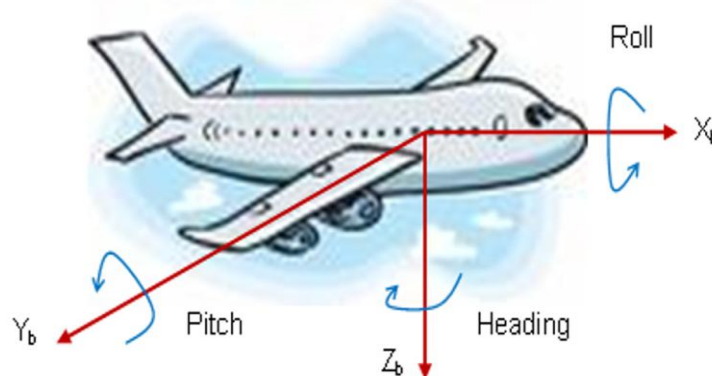
Sensorin käytössä tulee ottaa muutama asia huomioon. Suuri virta johtimissa, jotka ovat geomagneettisen moduulin lähetyvillä, voivat aikaansaada virheitä magneettikenttää mitatessa. Virran johtimiin indusoima magneettikenttä voi myös aiheuttaa virhettä mittauksissa. Suositellaan, että yli 10 mA virrat pidettäisiin muutaman millimetrin päässä IC-kotelosta.

3.3.1 LSM303DLH kompassina: suunnittelu ja käyttö /2/

Anturin peruskäyttöön kompassina tarvitaan vain magnetometriä, mutta koska IC-piirissä on kiihtyvyysanturi mukana, voidaan sitä käyttää kompensoimaan kallistuman aiheuttamaa vääristymää.

Jotta anturia voitaisiin hyödyntää kompassina, pitää ensin tutustua maan magneettikentän toimintaan. Magneettikentän voimakkuus on 0,5-0,6 gaussin asteikolla, ja sillä on samansuuntainen komponentti maanpinnan suhteen, eli se osoittaa aina magneettista pohjoisnapaa kohti. Pohjoisella pallonpuoliskolla, tämä kenttä osoittaa alaspäin, päiväntasaajalla horisonttiin, ja eteläisellä pallonpuoliskolla ylöspäin. Kulmaa, joka syntyy horisontin ja varsinaisen magneettikentän suunnan välille kutsutaan inkliinaatiokulmaksi. Toinen kulma, joka esiintyy maan maantieteellisen ja magneettisen pohjoisnavan välillä, on deklinaatiokulma, jonka suuruus vaihtelee $\pm 20^\circ$ välillä.

Kolmiulotteisissa kompassisovelluksissa ilmansuuntien kuvaamiseen käytetään usein lentokonemallia. Lentokonemallissa kiertymä mallinnetaan X Y ja Z akselilla. Kuvioista 24 selviää mikä akseli kuvaa mitäkin kiertymäsuuntaa (roll, pitch tai yaw/heading).



AM06765v1

Kuvio 24. Kiertymäsuunnat ilmaistuna XYZ koordinaatistossa. /2/

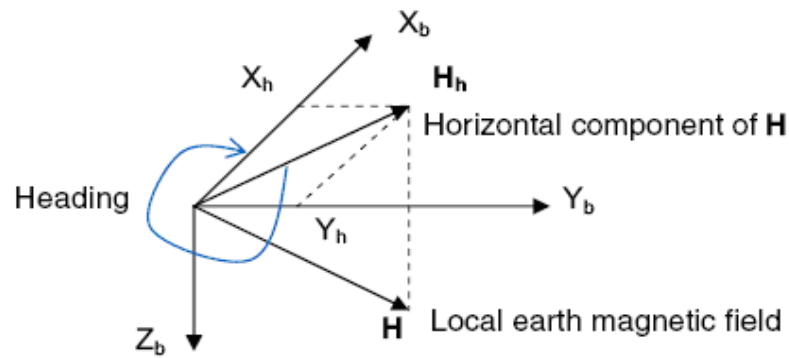
Kolme vakaasti asemoitua akselia viittaavat paikalliseen horisonttiin, joka on kohtisuorassa maan vetovoimaa kohden.

Suunta, tai heading määritellään myötäpäivään mitattavana kulmana, joka on X-akselin ja magneettisen pohjoisnavan välillä, kun tarkastellaan laitetta sen yläpuolelta.

Kaltevuus, tai pitch määritellään X-akselin ja horisontin välisenä kulmana. Kun laitetta kierretään Y-akselin suuntaisesti ylöspäin X-akselin noustessa ylöspäin (nokka taivasta kohti), pitch on merkiltään positiivinen ja kasvava.

Kiertymä, tai roll määritellään Y-akselin ja horisontin välisenä kulmana. Kun laitetta kierretään X-akselin suunnassa Y-akselin (siiven) liikkuessa alaspäin, roll kasvaa ja on merkiltään positiivinen.

Suunta pystytään määrittelemään kun laite on X ja Y tasoltaan nolla-asemassa (leveled position). Kuvioista 25 nähdään miten tämä suunta määritellään.



AM06777v1

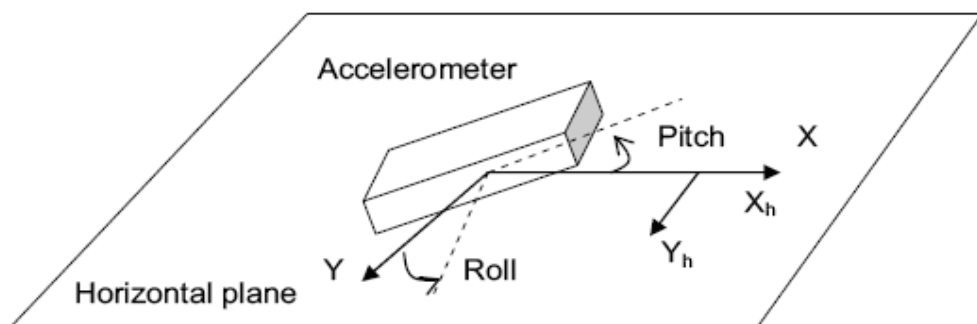
Kuvio 25. Suunnan määrittely koneen ollessa vaakatasossa (leveled). /2/

Paikallisella maan magneettikentällä H on kiinteä komponentti H_h horisontin suhteen, joka osoittaa maan magneettiseen pohjoiseen. Tämä komponentti voidaan mitata sensorin X ja Y -akselien (nimetty X_h ja Y_h) arvojen avulla. Tällöin suunta saadaan kaavasta:

$$\text{Suunta} = \arctan(Y_h / X_h) \quad (11)$$

Kuvion 25 mukaisessa tilanteessa, kun X_b on H_h (osoittaa magneettista pohjoista) suuntainen, $X_h = \max$ ja $Y_h = 0$, jolloin suunta on myös 0° . Kun laitetta kierretään myötäpäivään horisontin tasossa, suunta kasvaa. Kun $X_h = 0$ ja $Y_h = \max$, suunta on 90° . Yhä, kun $X_h = \min$ ja $Y_h = 0$, suunta on 180° jne. Täyden 360° rotaation jälkeen käyttäjä ”näkee” keskitetyn ympyrän jos piirretään kuva magneettisissa mittauksissa saaduista X_h ja Y_h arvoista.

Kun laitetta kallistetaan (tilt), suuntaan tulee hieman virhettä, kuten kuvioista 26 nähdään. Kallistuma voidaan kuitenkin mitata kiihtyvyysanturilla, ja kun magneettiset mittaustulokset kompensoidaan kiihtyvyysanturin arvoilla, saadaan kallistuskompensoitu suunta.



AM06778v1

Kuvio 26. Anturi kallistettuna. /2/

LSM303DLH on valmiiksi tehtaalla kalibroitu näyttämään noin 5% tarkkuudella suunnan, vaikka laite kallistettaisiin. Käyttäjä voi myös itse kalibroida laitteen jos katsoo sen tarpeelliseksi.

Kalibroimalla voi saada aikaan alle 2% mittatarkkuuden, jos 5% mittatarkkuus ei riitä. Kalibrointi tehdään kiihtyvyysanturin avulla. Kalibroimiseen on ohjeet laitteen datalehdessä /2/.

4. iNEMO demoalusta /20/

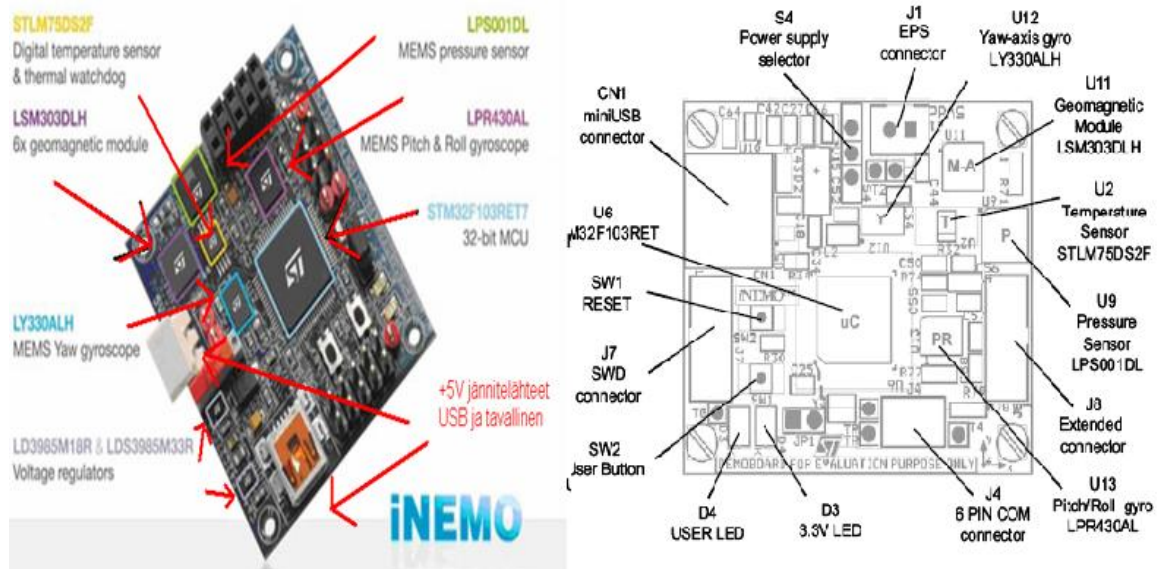
4.1 iNEMO Evaluation Board-demoalusta

Anturimittauksissa käytettiin ST Microelectronicsin valmistamaa iNEMO demoalustaa. iNEMO on evaluointikäyttöön tarkoitettu prosessorikortti, joka sisältää ARM-prosessorin ja useita antureita, muunmuassa kiihtyvyysanturin ja magnetometrin.

Demoalusta sisältää tarkemmin seuraavat komponentit:

- STM32F103RET7 Cortex-M3 ytimeen perustuva ARM-tekniikalla toteutettu mikrokontrolleri, joka toimii isäntäprosessorina antureille ja välittää antureiden tiedot USB-väylälle.
- LSM303DLH magnetometri ja kiihtyvyysanturipaketti joka käsiteltiin kappaleessa 3.3.
- LPR430AL ja LY330ALH gyroskoopit, jotka käsiteltiin kappaleessa 2.5.
- STLM75DS2F Lämpötila-anturi.
- LPS001DL Ilmanpaineanturi.
- +5V Jännitelähteet: USB ja tavallinen 2 napainen jännitelähde, sekä LD3985-sarjan jänniteregulaattorit.

Kuviosta 27 nähdään itse demoalustan, sekä antureiden asettelun.



Kuvio 27. iNEMO demoalusta sekä anturit. /20/

Demoalustalta löytyy myös 10-napainen liitinrima, josta löytyy muutama vapaana oleva prosessorin I/O-linja käyttäjän omia sovelluksia varten, 1 ledi ja painonappi käyttäjää varten, sekä reset-painike. Piirilevyn alta löytyy SD-korttipaikka, jonka avulla voi tallentaa esimerkiksi sensoridataa suoraan SD-kortille. Tämä toiminnallisuus saadaan käyttöön kun pidetään käyttäjälle tarkoitettu painonappi pohjassa sähköjä päällekytkettäessä.

Piirilevyllä löytyy lisäksi erillinen JTAG-liitin, jolla käyttäjä voi ohjelmoida ja debugata omia sovelluksiaan prosessorilla. Liitin tarvitsee sovittimen, joka tulee itse demokorin mukana.

Isäntäprossessorin valinnassa on 2 selkeästi hyvää puolta: prosessori on erittäin tehokas käydessään 72 Megahertsin maksimikellotaajuudellaan. Prosessorissa on paljon I/O-linjoja sekä valmiit sarja ja USB-liitännät. Lisäksi prosessorilta löytyy sisäinen CAN-ohjain, useita ajastimia, DMA-ohjain sekä tavallisen RS232 sarjaliitännän lisäksi I2C- ja SPI-liitännät.

Prossessorin huonoja puolia on mm. se, että siihen ei ole mahdollista kytkeä ulkoista A/D-muuntimen jännitereferenssiä, mikä heikentää A/D-muunnoksen tarkkuutta oleellisesti. Tämä tulee varmasti olemaan ongelma analogisia gyroskooppeja testatessa ja käytettäessä, sillä heikko tarkkuus aiheuttaa kohinaa.

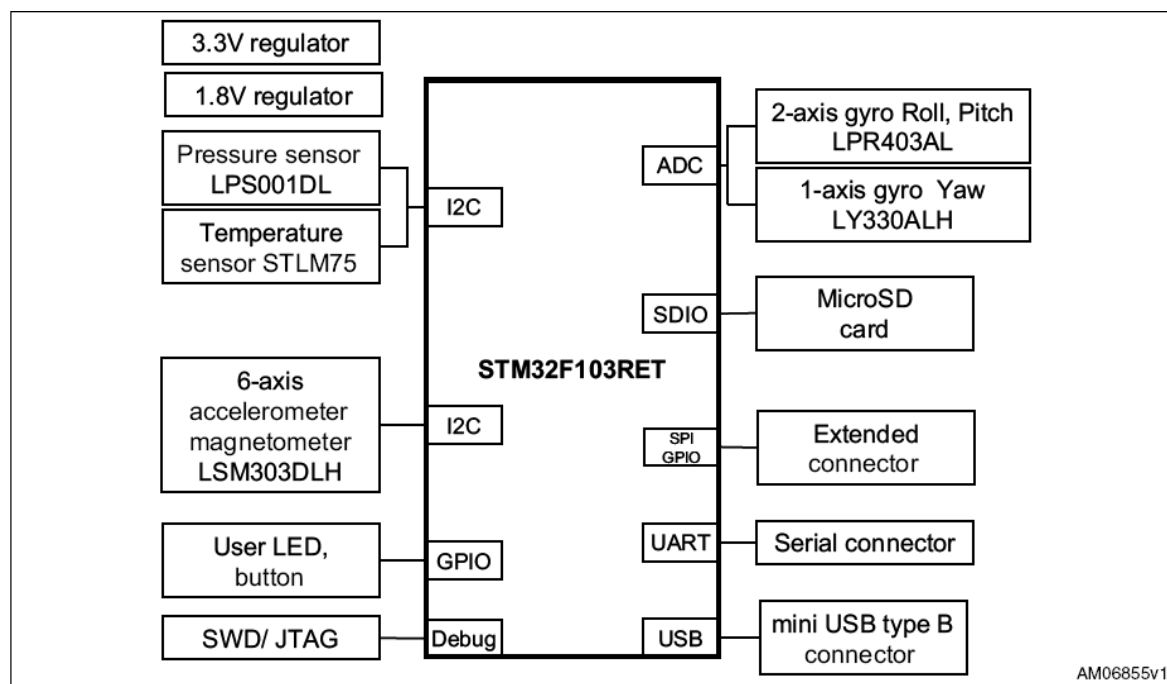
Toinen ongelma heikossa muuntotarkkuudessa on antureiden ulostulojännitteen muutokset kun kulmanopeus on pieni: esimerkiksi LPR430AL ulostulo muuttuu $\pm 3,3$ mV kun kulmanopeus muuttuu ± 1 dps /12/.

4.2 iNEMO: Datan keräys ja lähetys /20, 1e/

Anturit keskustelevat isäntäprossessorille kahdella tavalla: analoginen signaali sekä sarjaväylä (I2C). Isäntäprossessori on ST Microelectronicsin ARM-teknologiaan, Cortex-M3-ytimeen perustuva prosessori: STM32F103RET7.

Isäntäprossessori hoitaa analogisensoreiden sensoridatan muuntamisen digitaaliseen muotoon sisäisellä A/D-muuntimellaan ja digitaalisten sensorien pollaukseen (kysely) sekä datan vastaanottamisen. Tiedot lähetetään edelleen eteenpäin virtuaalisarjaporttiin, joka on todellisuudessa laitteen USB-väylä. iNEMO:n ajurilla laite tunnistuu Windowsissa aitona sarjaporttina. Virtuaalisarjaportin laitetiedot sekä USB-deskriptorit on ohjelmoitu itse demoalustan firmwareen.

Kuviosta 28 nähdään lohkokaavion, miten antureiden, isäntäprossessorin ja PC:n välinen keskustelu on toteutettu.



Kuvio 28. Lohkokaavio siitä, miten keskustelu eri laitteiden välillä toimii. /20/

Isäntäprosessorin datan keräys- ja lähetysohjelmisto pyörii reaaliaikakäyttöjärjestelmän (FreeRTOS) päällä. Käyttöjärjestelmä jakaa prosesseille prosessoriaikaa, jos ne sitä tarvitsevat. Reaaliaikakäyttöjärjestelmällä on kaksi pääprosessia:

- GUI Parser, eli käyttöliittymän komentotulkki. Komentotulkki ottaa Windowsissa ajettavasta iNEMO Suite Applicationista käskyjä vastaan virtuaalisarjaportin kautta, ja tulkitsee niitä. Komentotulkin päätehtävä on käynnistää sensoreiden luku, ja muuttaa sensoreiden parametreja lennosta.
- Dataprocess, eli datan prosessointi. Tämä prosessi lukee muistista antureiden lähettämät arvot, ja edelleen lähettää ne virtuaalisarjaporttiin (USB). Uloslähetettävään dataan lisätään myös dataikkunan (frame) pituus ja tyyppi, jotta Windowsissa ajettava käyttöliittymä ymmärtää minkä anturin tiedot on tulossa jne.

Analogiantureiden ulostulojen jännitteitä seurataan ja mitataan A/D-muuntimella. Muunnoksen tulos tallentuu muistiin.

Digitaalitalimittareilta vuoroin pyydetään sensoridataa ja vuoroin data vastaanotetaan. Tämä johtuu I2C-väylän rakenteesta: siinä on vain yksi linja datansiirrolle, joten datan lähetyks ja luku on tehtävä eri aikaan. Data luetaan myös muistiin, josta se voidaan lukea myöhemmin.

Datankeruu hoituu ajastetusti semaforeilla. Dataprocess-sovellus nostaa semaforin ylös, ja odottaa kunnes timer2 laskee sen (antaa ajoluvan). Timer2 on käynnistyksen yhteydessä sammutettu, jolloin semafori ei vapaudu. Kun GUIParser-sovelluksesta laitetaan datankeruu päälle, käytännössä laitetaan vain timer2 käyntiin, jolloin semafori vapautetaan aina halutun intervallin välein. Käytettävissä olevat, valmiiksi lasketut intervallit ovat 1 Hz, 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz ja 400 Hz.

Käyttöjärjestelmä sammuttaa dataprocess-sovelluksen, jos dataa ei erikseen pyydetä, ja käynnistää sen vapauttamalla semaforin, jos datankeruu halutaan käynnistää.

Datankeruu hoidettiin 10 Hz ja 50 Hz intervalleilla. Se, kumpaa intervallia käytettiin, ilmoitetaan erikseen luvussa 5 olevassa mittaustulosten tarkastelussa.

Prossessorin firmwareassa oli myös pohja valmiille anturifuusiolle, jonka pohjalta oli luotu yksinkertainen AHRS-sovellus. AHRS-järjestelmä ei kuitenkaan toiminut oikein, sillä magnetometrin arvot leikkaantuvat herkimmillä mittatarkkuudella (Kuvio 34), jotka asettuvat käyttöön AHRS-tilassa. Lisäksi, AHRS-lähdekoodi oli kirjastomuodossa (.lib), joten siihen ei pääse käsiksi mitenkään. Tämä tarkoittaa sitä, että herkkyyksiin ei voida tehdä muutoksia. Kirjastomuotoon laitettu koodi on ymmärrettävää, sillä automaattisten korjausalgoritmien suunnitteleminen vie paljon aikaa, joten kynnys julkaista niistä lähdekoodia on suuri.

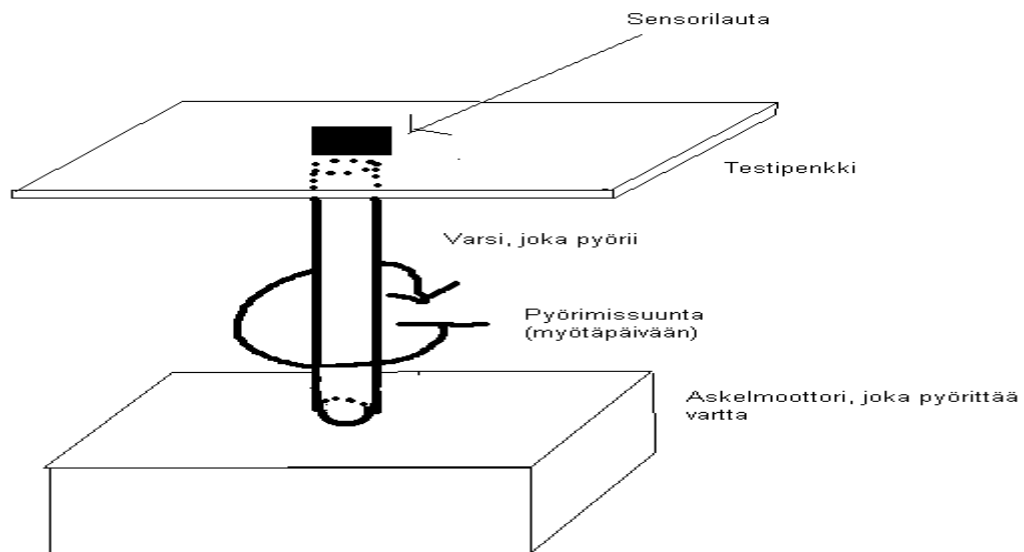
Avoimen lähdekoodin AHRS-järjestelmiä löytyy ainakin yksi, OpenPilot AHRS /21/. OpenPilot on suunniteltu pieniin UAV-laitteisiin, kuten lennokkeihin ja helikoptereihin. OpenPilotista ei kuitenkaan ole mitään julkaisuversiota vielä ulkona, sillä projekti on kohtalaisen uusi.

Koska OpenPilotia ei voida hyödyntää tässä vaiheessa, ei siihen tutustuta sen tarkemmin.

5. Antureiden testaus ja mittaustulosten analysointi.

5.1 Mittaukset häiriöttömissä olosuhteissa (laboratorio)

Antureita testattiin Novatronin tuotekehittelytiloissa, sekä kiihtyvyyssantureiden kalibrointia varten suunnitellussa pyörivässä testipenkissä. Laitetta käännettiin täydet 360°. Testipenkki oli askelmoottori, jota ajettiin 1000000 askeleen verran pienellä ja erittäin stabiililla kulmanopeudella. Kuviosta 29 nähdään askelmoottorin ja sensoreiden asettelu.



Kuvio 29. Askelmoottori ja testipenkki.

Häiriöttömissä olosuhteissa magnetometrin arvon pitäisi ”pyörähtää” ympäri eli muuttua ensin johonkin suuntaan, ja 180° käännyksen jälkeen palata takaisin lähtöarvoonsa. Koska laite on horisontin suhteen vaakatasossa, suuntavektoria ei tarvitse tilt-kompensoida.

Magnetometrin tarkkuus saadaan kun tarkkaillaan X- tai Y-vektoria nolatilanteen suhteen. Suuntavektori saadaan kaavasta (11), suunnan pitäisi pysyä vakiona laitteen ollessa vaakatasossa.

Kuviosta 30 nähdään gyroskoopin LY330ALH mittatarkkuus, kun laitetta pyöritetään askelmoottorilla 360°. Näytteenottotaajuus on 50 Hz ja kierrokseen kuluu noin 60 sekuntia (60000 ms). Se, tietääkö anturi pyörineensä täyden kierroksen, nähdään kulmanopeuden muutoshetkien välisestä ajasta. Mittaustuloksista katsottuna anturi tuntee olevansa pyörimisliikkeessä 60360 ± 40 ms, eli anturi on kohtalaisen tarkka, olettaen että Novatronin kalibraatiolaitteella kestää tasan 60000 ms pyörähtää täysin ympäri.

Toinen tapa laskea anturin tuntema kulma olisi käyttää yksinkertaista laskukaavaa:

$$\text{Anturin tuntema kulma} = \text{pyörimisaika} * \text{kulmanopeus} \quad (12)$$

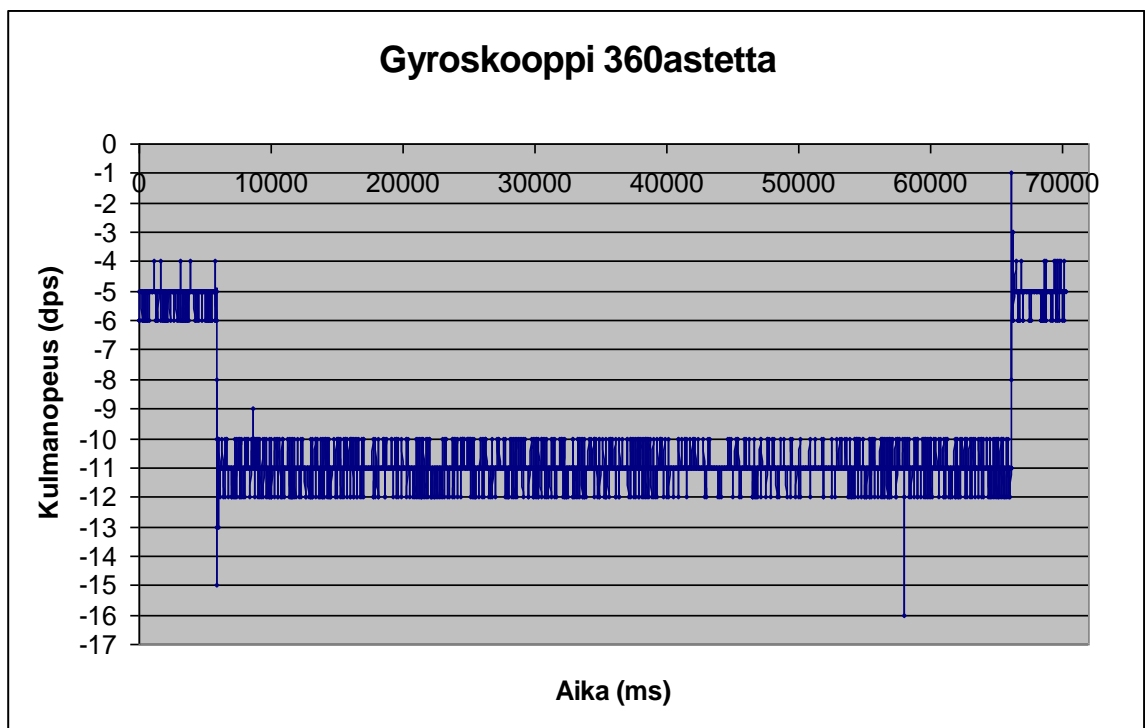
Kuviosta 30 pitää huomioida kulmanopeus, joka on negatiivinen myötäpäivään kierrettäessä. Kulmanopeus pitää myös kalibroida anturin ulostulon ryöminnän mukaan. Varsinainen kulmanopeus on keskiarvoilla laskettuna $11-5(\text{dps}) = 6\text{dps}$.

Kaavalla (12) saadaan kulmaksi $Kulma = 60,360 \text{ s} * 6 \text{ dps} = 362^\circ$.

LY330ALH:lla saatua tulosta voidaan soveltaa myös anturiin LPR430AL, sillä tunnistamistekniikka (varsinainen sensori) on sama.

Tuloksista nähdään, että vaikka askelmoottori pyörii lähes täysin tasaisella nopeudella, mittalaitteiston herkkyys ei riitä antamaan kulmanopeutena silti absoluuttisen tarkkaa tulosta. Yksi kohinan aiheuttaja saattaa olla itse gyroanturi, jonka herkkyys ei vaan riitä mittaamaan täydellisesti kulmanopeutta. Myös askelmoottori saattaa aiheuttaa pientä värinää pöytään.

Toinen, todennäköisempi virheen aiheuttaja on iNEMO demoalustan käyttämän ARM-prosessorin kohiseva käyttöjännite, joka toimii referenssinä niin gyroskooppianturille, kuin prosessorin sisäiselle A/D-muuntimelle.

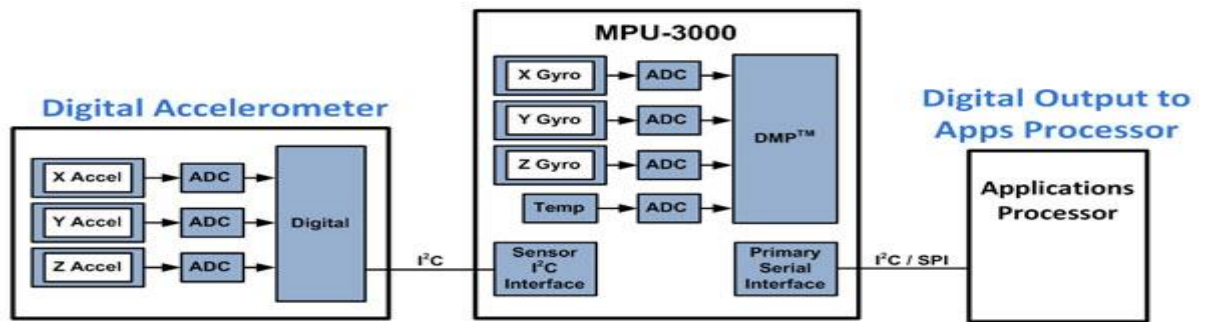


Kuvio 30. Gyroskoopin tarkkuuden mittaus häiriöttömissä olosuhteissa.

Ongelmien ratkaisemiseksi voidaan yrittää useita toimenpiteitä. Ensimmäinen tapa on hankkia tarkempi jännitereferenssi anturille, tai tarkempi käyttöjännite isäntäprosessorille. Toinen, huomattavasti helpompi vaihtoehto on vaihtaa anturityyppi digitaaliseksi, jolloin virhettä aiheuttavien komponenttien määrä pienenee oleellisesti: tarvitsee vain huolehtia että digitaali-anturin käyttöjännite on vakaa.

Digitaalisissa gyroantureissa on sisäinen A/D-muunnin ja suodimet, jotka ovat usein juuri anturia varten suunniteltuja, täten tarkoitukseensa erittäin tarkkoja ja tehokkaita.

Yksi hyvä digitaalinen vaihtoehtoanturi voisi olla InvenSensen MPU-3000, joka on 3-akselinen, I2C-väylää käyttävä digitaaligyro. Kuviossa 31 nähdään kyseisen anturin lohkokaavio, josta voidaan todeta sisäiset komponentit: ADC, liikkeen- ja eletunnistuksen mahdollistava DMP-prosessori sekä I2C-väylät. Laitteessa on myös sisäiset ali- ja ylipäästösuodimet jokaiselle mitattavalle kanavalle. /19/

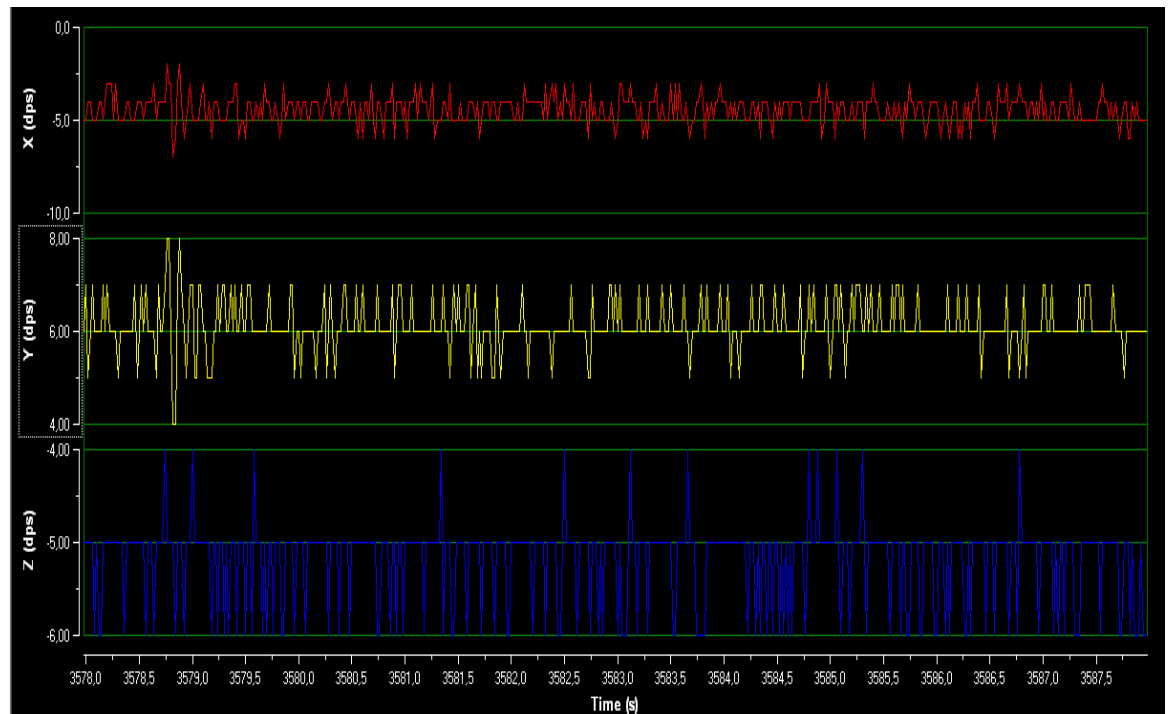


Kuvio 31. InvenSensen MPU-3000 3-akselisen gyroanturin lohkokaavio. /19/

Kuviosta 31 nähdään myös anturin tarjoama mahdollisuus 6-akseliselle toiminnalle, jossa otetaan kiihtyvyyssanturi mukaan. Tämä on myös yksi anturifuusion tyyppi jolla voidaan kompensoida pelkkien antureiden heikkoutta.

Toinen heikkous mitatuissa gyroissa on niinsanottu ”ryömintä” tai ”ryöminen” joka tarkoittaa rippel-jännitteen kasvua/nousua ajan myötä. Tämä nähdään ulostulossa jännitteen hitaana nousuna/laskuna, kun antureiden annetaan olla täysin paikallaan jonkin aikaa. Kuviosta 32 nähdään gyroskooppien nollatason ryöminnin kahvitaun mittaisena (noin 15 minuuttia) aikana.

Kuvio on zoomattu pystyakselilla lähemmäs, jotta nollataso erottuu helpommin. Kuviosta näkee selvästi, kuinka yksikään antureista ei ole enää samassa nollapisteessä, kuin mittaukset aloitettaessa (dps arvo 0).

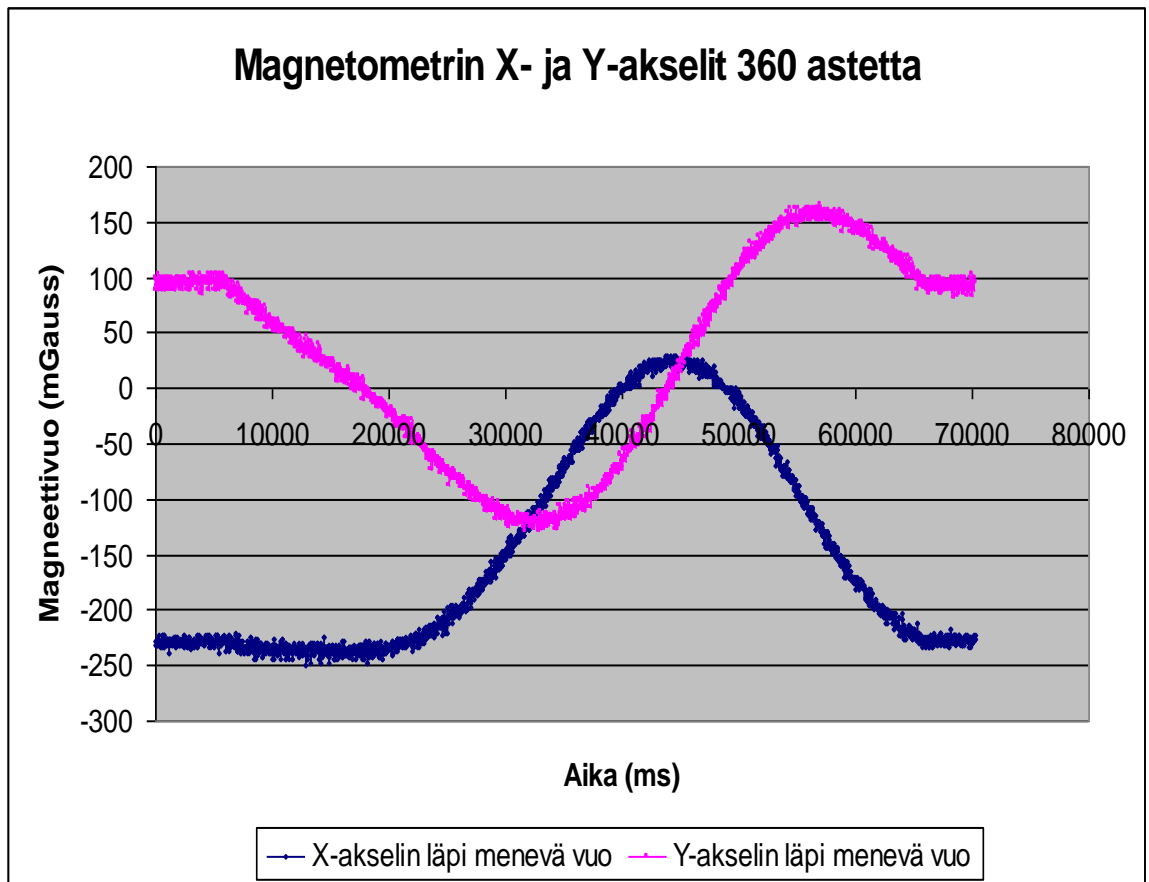


Kuvio 32. Gyrojen ryömintä antureiden ollessa 15 minuuttia paikallaan.

Ryöminnin poistamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi ohjelmallista offset-arvoa, joka muutetaan aina muutaman minuutin välein. Offset-arvo on anturin paikallaan ollessa havaitseman kulmanopeuden (nollakohdan) ero laitetta käynnistettäessä ylösotettuun nollakohtaan. Esimerkiksi kuvion 32 mukaisessa tilanteessa Z-akselilta mitattuun arvoon pitäisi lisätä +5 dps.

Ulostulon ryömintää voidaan yrittää korjata anturin tai isäntäprosessorin käyttöjännitteen suodatuksella, tai paremmalla referenssijännittelähteellä. iNEMO demoalustalla olevassa ARM-prosessorissa ei tosin ole mahdollisuutta kytkeä ulkoista A/D-jännitereferenssiä, joten tässä tapauksessa korjausta ei voida tehdä kyseisellä tavalla.

Myös magnetometrin toimintaa mitattiin samalla testimenetelmällä. Kuviosta 33 nähdään kuinka magneettivuo muuttuu kun laitetta pyöritetään testipenkissä. Jos laite on aivan vaakatasossa horisontin suhteen, vain X- ja Y-akselin arvot muuttuvat, ja niiden välinen vaihe-ero pitäisi olla tasan 90-astetta.



Kuvio 33. Magnetometrin X ja Y-akselin arvot 360° pyörähdyksessä.

Kuviosta 33 nähdään, että magnetometri toimii kuten pitääkin, eli se tunnistaa pyörivänsä paikallaan. Arvojen tulisi käyttäytyä niin, että lähdetään ensin nousemaan tai laskemaan jostain lähtöarvosta tiettyyn huippupisteeseen, jonka jälkeen palataan samaan lähtöpisteeseen takaisin, kun on pyörähdetty täysi kierros. Myös vaihe-ero näyttäisi olevan 90-astetta.

Käyrän pitäisi muistuttaa siniaaltoja. Kuten kuviosta 33 voidaan todeta, magnetometrin X-akselin kuvaaja on lähes täydellinen siniaallon kuvaaja.

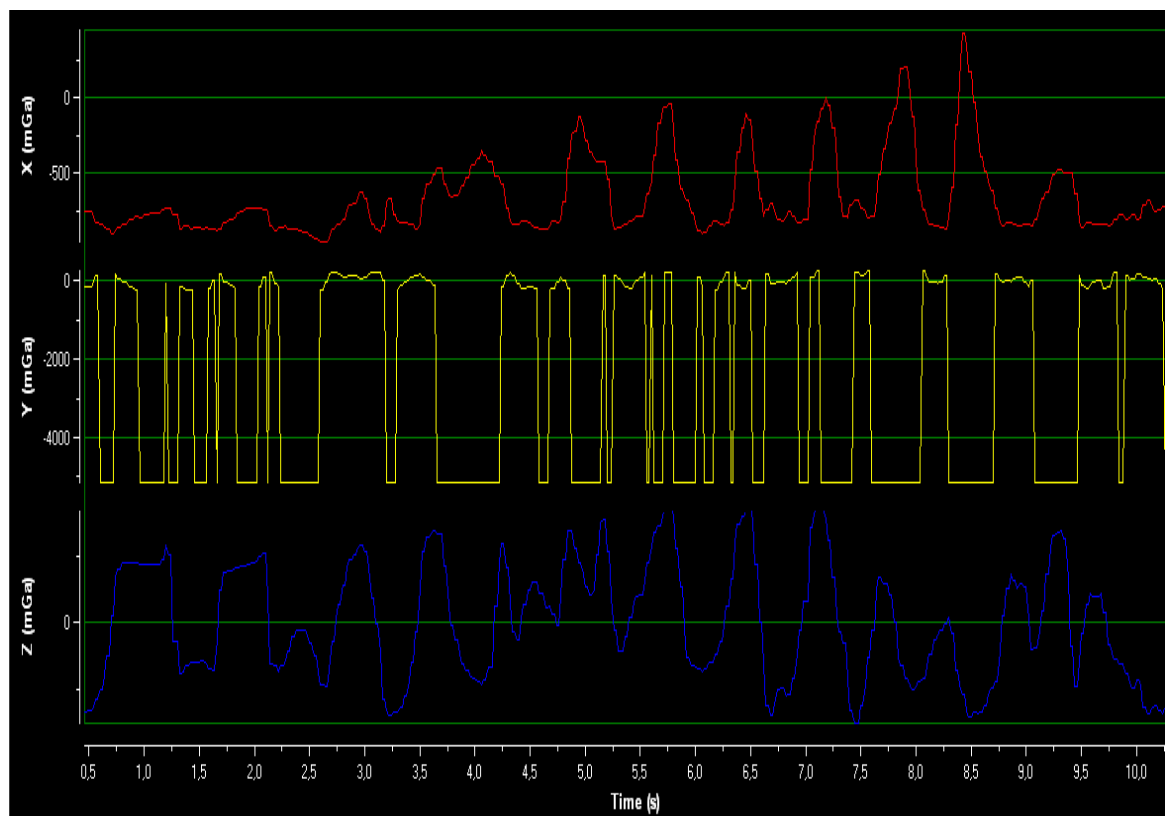
Y-akselin pyörähdysten alussa arvo käyttäytyy enemmänkin lineaarisesti, ja lopussa arvo nousee hieman aloitusarvoa suuremmaksi. Tämä voi johtua anturin sijainnista iNEMO demoalustalla, mutta suuremmalla todennäköisyydellä se johtuu demoalustan suunnittelussa sattuneesta virheestä. Kolmas syy käytökselle voi yksinkertaisesti olla se, että piiri on rikki. Myös itse askelmoottori voi aiheuttaa tämän ilmiön.

LSM303DLH:n datalehdessä /18, s-22/ selviää, että johtimet, joissa kulkee yli 10 mA virta, pitäisi sijoittaa mahdollisimman kauaksi geomagneettisesta moduulista. Johtimiin indusoituva magneettikenttä häiritsee aivan varmasti herkkää sensoria.

Kuviosta 27 nähdään, geomagneettinen moduuli on sijoitettu aivan +5V jännitelähteen viereen, joten on erittäin suuri todennäköisyys että piirin käyttöjännitelinja häiritsee magnetometrin toimintaa ajoittain.

Y-akseli saattaa myös havaita itse askelmoottorin, joka on sähkökäyttöinen moottori ja häiritsee magnetometrin toimintaa.

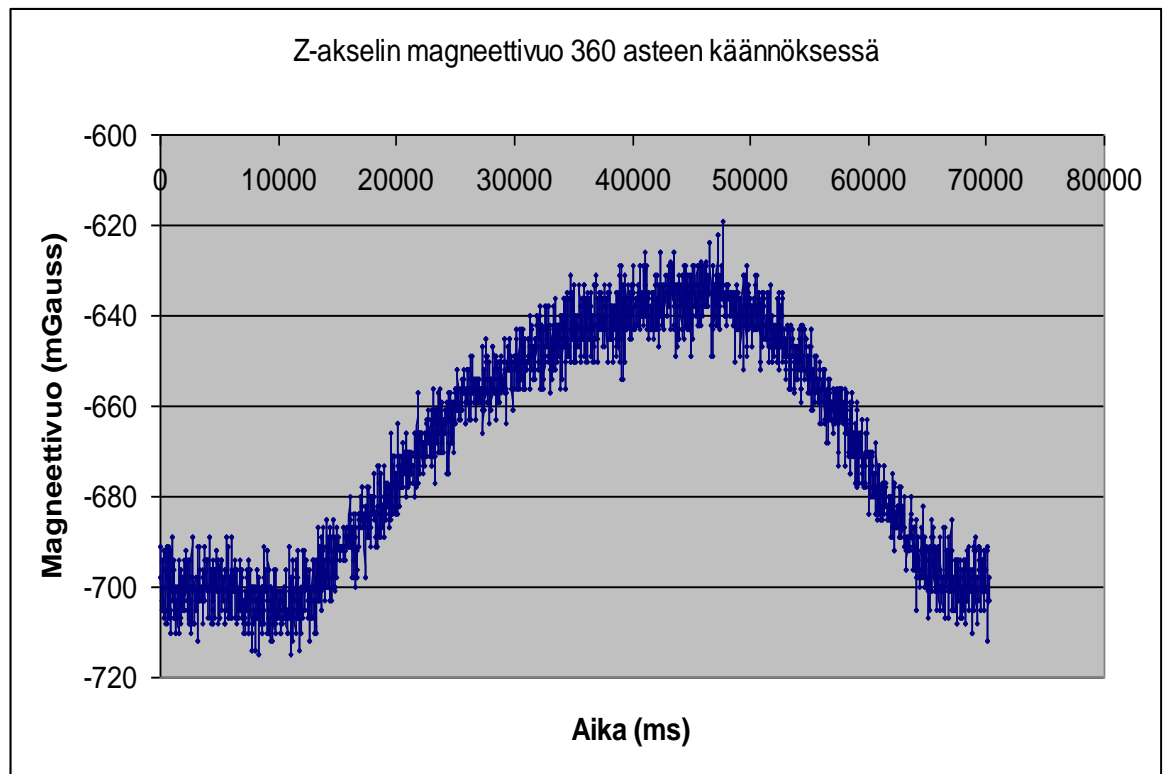
Magnetometrin toiminnasta havaittiin myös toinen erikoinen piirre, että kun piirin herkkyys nostetaan maksimiin, arvot leikkaavat rajusti usealla tuhannella milligaussilla. Tämä ilmiö voidaan todeta kuviosta 34 Y-akselin arvojen todella suurena vaihteluna. Huomaa kuvion vasemmasta laidasta akseleiden mitta-asteikot, eritoten se, että Y-akselilla arvot vaihtelevat yli 4500 milligaussia, kun X- ja Z-akselit vaihtelevat vain noin 500 milligaussin verran. Tämä ilmiö näkyy myös muilla akseleilla satunnaisesti, mutta yleisimmin Y-akselilla.



Kuvio 34. Magnetometrin Y-akselin leikkaus suurimmalla mittatarkkuudella.

Kuviossa 35 on esitetty Z-akselin läpimenevän vuon muutos laitteen pyöriessä 360°. Vuon muutos johtuu luultavasti askelmoottorista. Z-akselilla on myös paljon tasaista kohinaa, joka jatkuu myös pyörimisliikkeen loputtua. Tämä viittaa siihen että kohina aiheutuu anturissa sisäisesti, eikä askelmoottori vaikuta kohinaan.

Kuviosta voidaan myös todeta magneettikentän todellinen suunta Suomessa. Magneettikenttä osoittaa horisontin suhteen vinosti alaspäin, siksi Z-komponentti on erittäin vahva verrattuna X- ja Y-komponentteihin.



Kuvio 35. Z-akselin läpi menevä magneettivuo.

5.2 Mittaukset häiriöllisissä olosuhteissa (kaivinkone)

Mittaukset häiriöllisissä olosuhteissa suoritettiin Novatronin omalla kaivinkoneella yrityksen takapihalla.

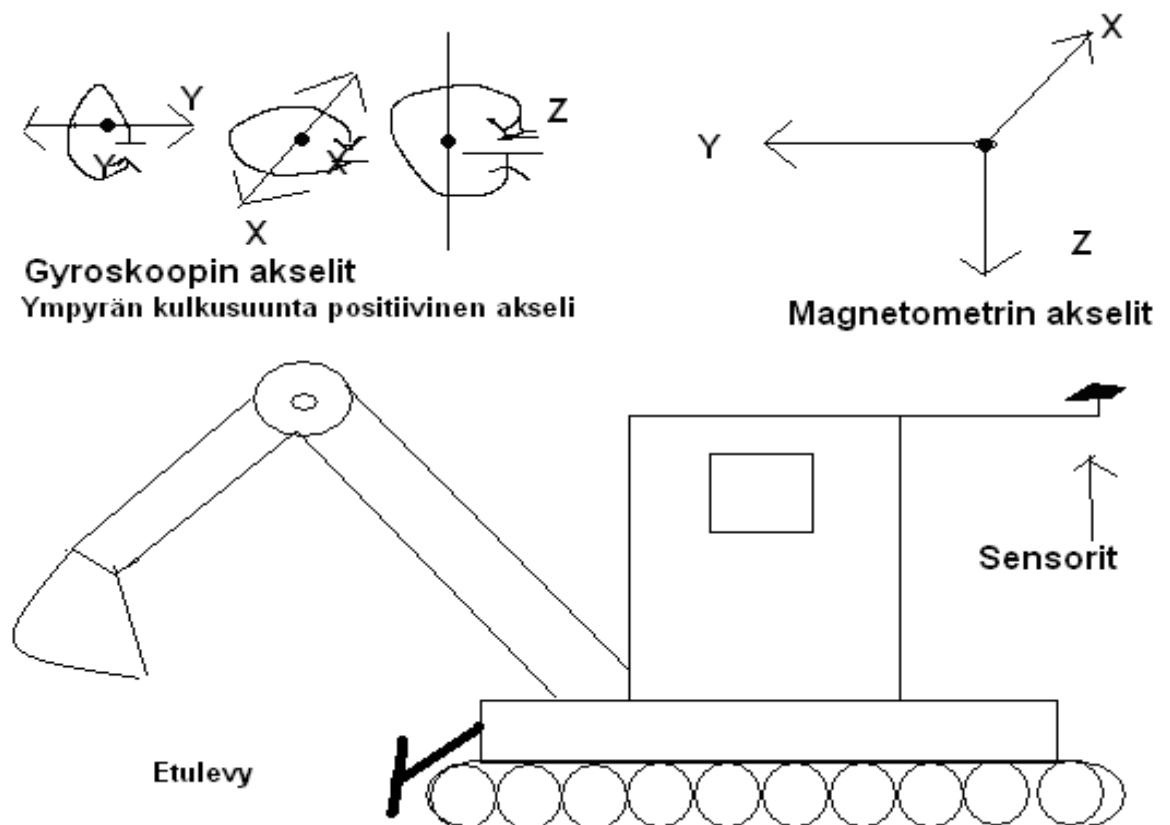
Mittaukset suoritettiin kahdessa osassa. Ensin suoritettiin pieni ajotesti ja mitattiin gyroskoopin ja magnetometrin ulostuloa, jotta nähdään miten sensorit käyttäytyvät ajon aikana.

Toisessa vaiheessa tehtiin testejä kaivurin ollessa paikallaan. Tässä työvaiheessa ensin mitattiin, miten anturit käyttäytyvät rauhallisessa työssä (puomin liikutusta, kaivurin pyöritystä).

Seuraavaksi yritettiin simuloida mahdollisimman vaikeita olosuhteita, kaivuria tärisytettiin sekä käännettiin niin lujaa, kuin kuljettaja uskalsi. Lopuksi testattiin vielä miten antureiden arvot käyttäytyvät puomin asennon muuttuessa, eli onko puomi ylhäällä vai alhaalla ja onko kauha aivan koneessa kiinni, vai mahdollisimman kaukana.

Anturit sijoitettiin kaivinkoneen takana olevaan alumiiniseen kehikkoon 20-30cm korkuisen vaahtomuovipalan päälle magnetometrin häiriöiden minimoimiseksi.

Kaikissa kaivinkoneessa tehdyissä mittauksissa käytettiin 10 Hz näytteenottotaajuuutta. Gyroskooppeja ajettiin ± 300 dps tarkkuudella ja magnetometriä $\pm 2,5$ mGauss herkkyydellä



Kuvio 36. Kaivinkone ja sensorit sekä sensoreiden akselien suunnat suhteessa koneeseen.

Ensimmäisenä tutkitaan gyrokoopin käyttäytymistä koneen ollessa sammutettuna, jonka jälkeen kaivuri käynnistettiin ja sillä ajettiin pieni pala, ja pysähdyttiin. Pysähdyksen jälkeen kone oli käynnistettynä paikoillaan mittauksen lopettamiseen saakka. Kuvioista 37, 38, ja 39 nähdään kuinka gyrokoopit käyttäytyvät ennen ja jälkeen pienen ajomatkan, sekä itse matkan aikana. Gyrokoopin orientaatio kaivinkoneen suhteen nähdään kuvioista 36.

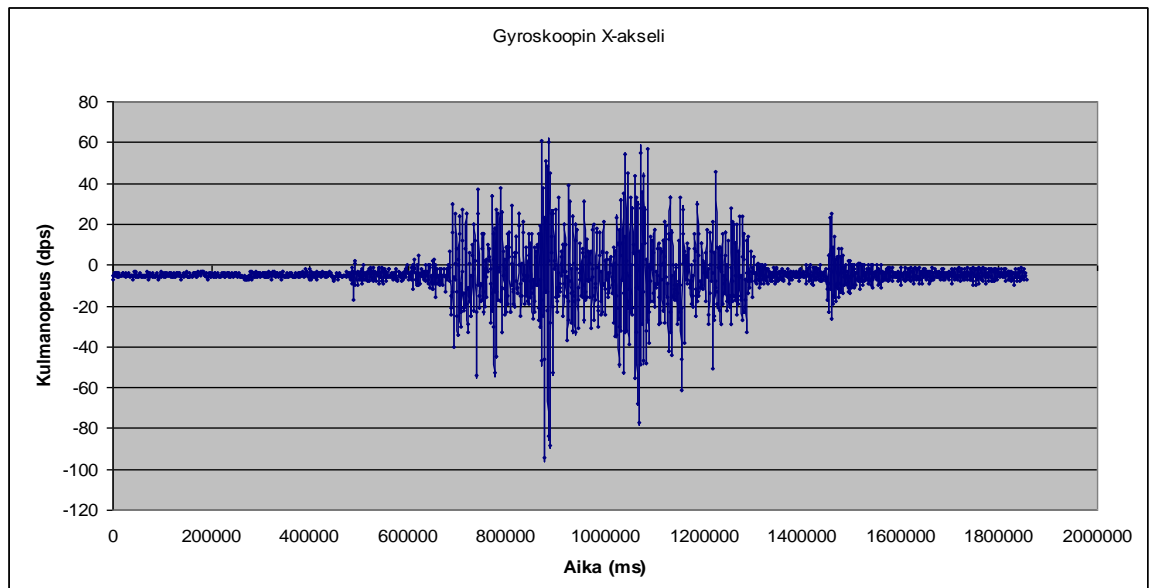
Kuvioissa 37-39 on tarkoituksella sama skaala pystyakselilla, vaikka X-anturin arvot vaihtelevat hetkittäin skaalan yli ja alle. Nämä hetkittäiset (muutaman millisekunnin) heitot pitää ottaa huomioon, ja suodattaa pois.

Kuvioista nähdään, että gyrokooppien ulostulo ei merkittävästi kohise laitteen ollessa sammutettuna, mutta heti kun moottori käynnistettiin (noin 50s kohta), arvot alkavat vaihtelevaan joka akselilla.

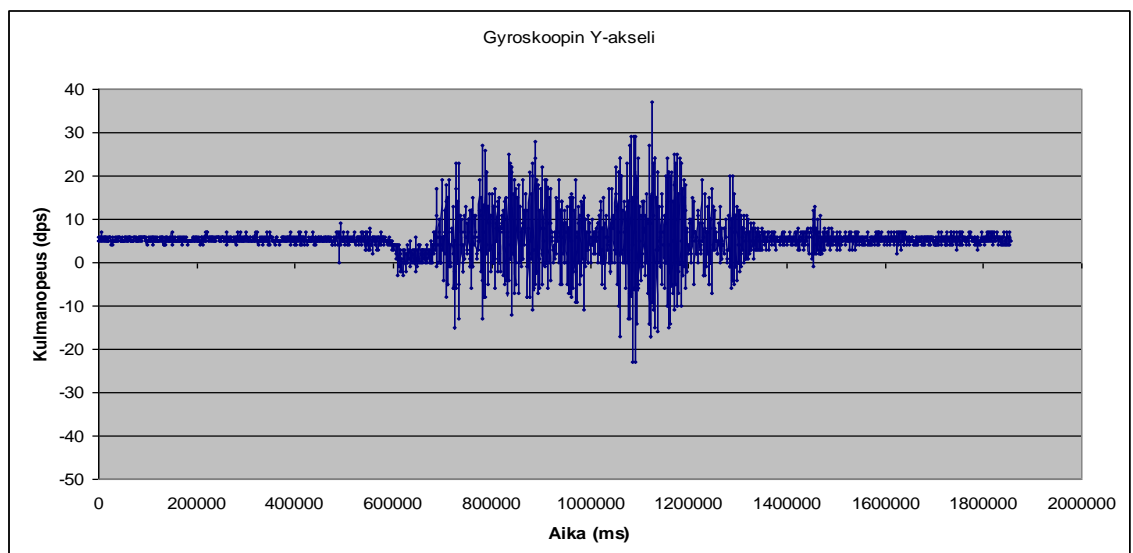
Yksi huomionarvoinen asia on myös se, että gyrokoopin Y-akselin ulostulo on ryöminyt jo huomattavasti ylöspäin sähköjen kytkemisen ja näytteistuksen aloittamishetken välillä. Viive näiden toimenpiteiden välillä on muutamia kymmeniä sekunteja.

Kuvioista voidaan myös todeta, että gyroanturin sijoitus jatkuvasti tärisevään alumiinivarteen ei missään tapauksessa ole hyvä idea. Jokainen muutos maanpinnassa (kuoppa), minkä kautta kaivinkoneella ajetaan näkyy eritoten X-akselin arvon rajuna hetkittäisenä vaihteluna (anturi nyökkäile/kaatuu taaksepäin).

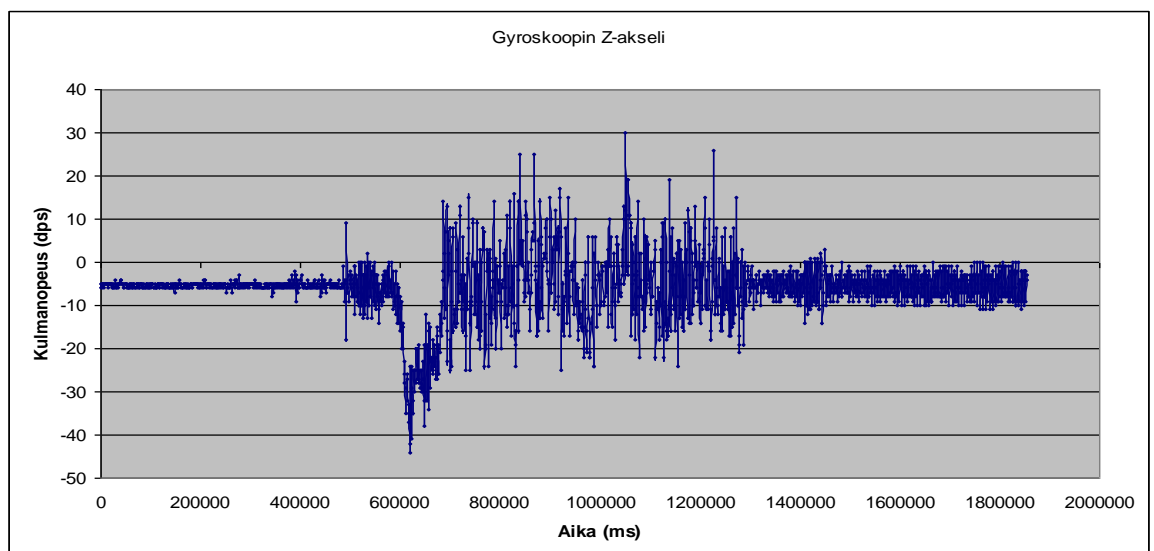
Kuoppien vaikutus korostuu entisestään anturin kehon tukipisteen vuoksi, sekä alumiinikehikon toimiessa vipuvartena.



Kuvio 37. Gyroskoopin X-akseli kone sammuksissa, ajon aikana, ja ajon jälkeen



Kuvio 38. Gyroskoopin Y-akseli kone sammuksissa, ajon aikana, ja ajon jälkeen



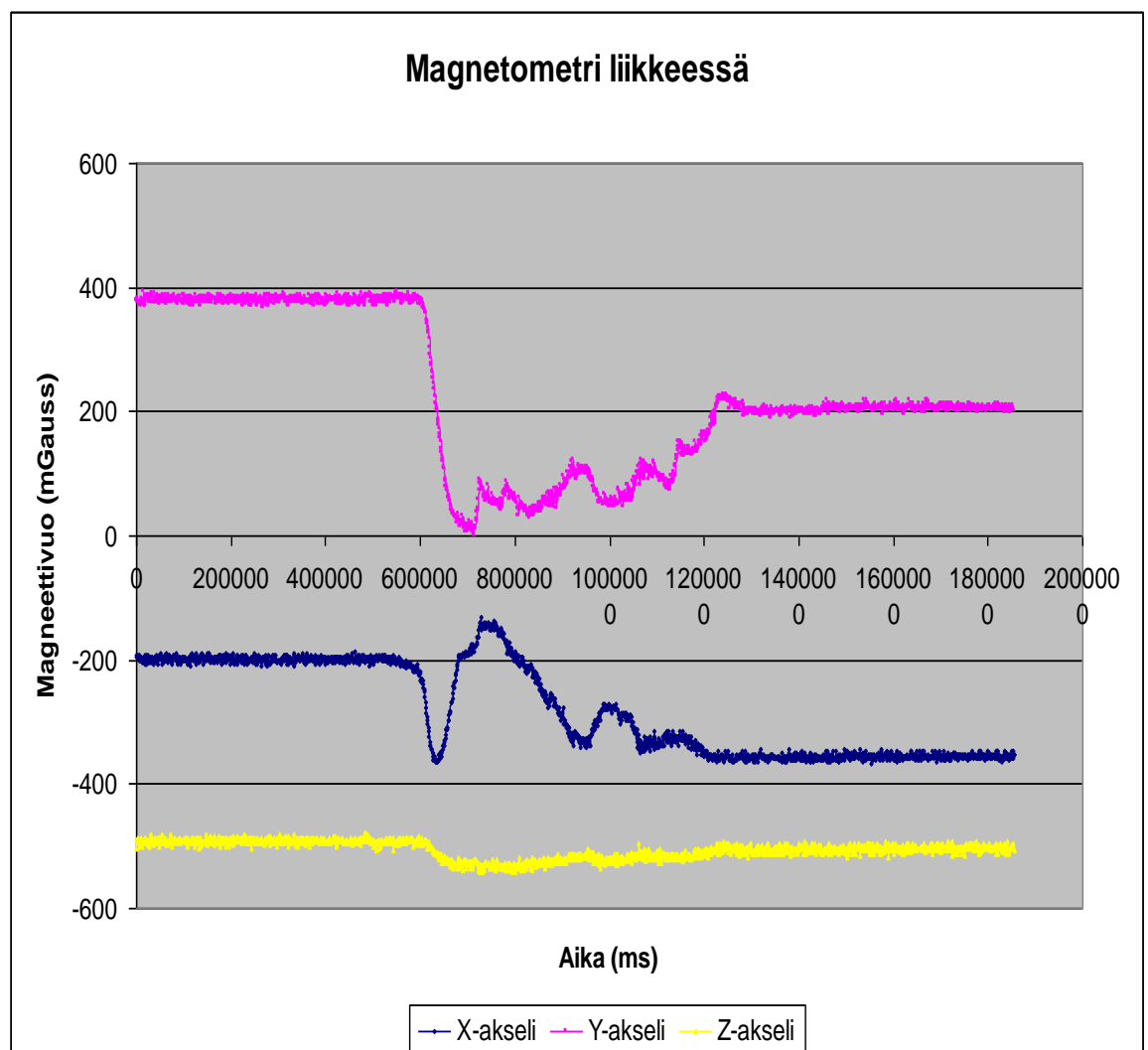
Kuvio 39. Gyroskoopin Z-akseli kone sammuksissa, ajon aikana, ja ajon jälkeen

Kuvioissa noin 150 s kohdalla on kohta, jossa kaivuri pysäytetään. Kohdassa näkyy joka akselilla selkeä nytkähdys, tosin yhä X-akseli reagoi selkeästi voimakkaimmin. Pysähdyksen jälkeen nähdään selkeästi joka akselilla huomattavasti enemmän kohinaa, kuin ennen moottorin käynnistystä.

Tämä johtuu luonnollisesti moottorin aiheuttamasta värinästä. Kuvioista voi myös etsiä, nouseeko antureiden nollapiste ajon aikana aiheutuneiden suurien kulmakiiktyvyysien mukaan. Kuitenkaan merkittävää nollakohdan muutosta ei noin 100 s kestäneen ajopätkän jälkeen ole nähtävissä.

Vaikka antureiden arvoihin syntyy runsaasti kohinaa, ei tämä tule olemaan mikään ongelma, jos antureihin kytketään sähköt ennen moottorin käynnistystä ja kalibroidaan nollakohta. Kohina voidaan suodattaa helposti pois kun keskiarvotetaan hetki amplitudia ennen ja jälkeen käynnistykseen.

Ajon aikana kerättiin myös magnetometriltä tietoja, jotta nähdään, kuinka tarkasti suunta saadaan kyseisellä anturilla laskettua. Anturi voidaan olettaa olevan horisontin kanssa vaakatasossa. Mittauksessa oleellista on, että magnetometri on koneesta tarpeeksi kaukana, ettei se luule kaivuria pohjoisnavaksi.

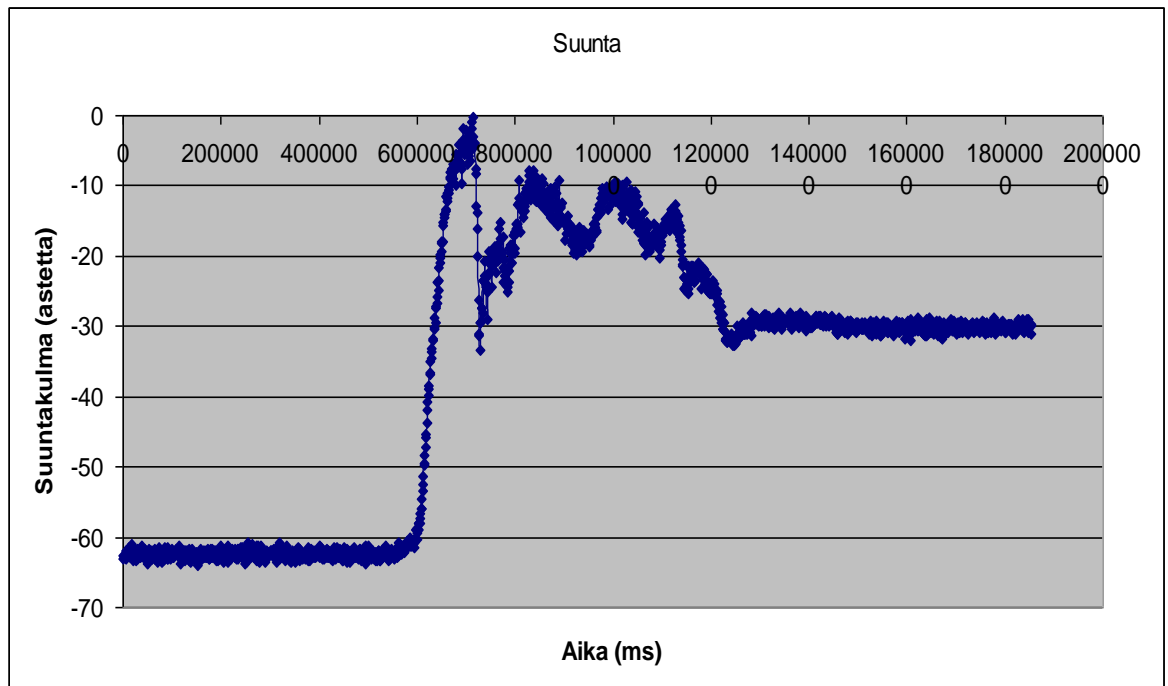


Kuvio 40. Magnetometrin arvot kaivuria liikuttaessa.

Kuviosta 40 nähdään jälleen, että Z-suuntainen vektori on dominoiva ja stabiili, kuten pitääkin. Huomioitavaa on myös, että Y-suuntainen vektori on myös hyvin voimakas, mikä viittaa siihen että anturi selvästi tuntee kaivinkoneen aiheuttaman vääristymän magneettikentässä. Kuviosta 36 nähdään, että Y-suuntainen vektori osoittaa kaivinkoneeseen päin.

Kuviosta 40 kuitenkin selviää, että ajon aikana suunnantunnistus toimii kohtalaisen hyvin. X- ja Y-akselien muutokset ovat kutakuinkin yhtä suuria, mutta vastakkaissuuntaisia. 60-65 sekunnin kohdalla on omituinen magneettivuon notkahdus X-akselilla, kun laitetta käännettäessä Y-akselin laskeva tulos pitäisi näkyä X-akselin nousevana tuloksena. Nämä rajut notkahdukset saattavat selittyä kaivurin itsensä aiheuttamalla magneettikentällä ajettaessa, eli moottorin käydessä.

Suunta saadaan kaavasta (11). Kuviosta 41 nähdään suuntakulma, nollakohta on pohjoisnapa ja positiiviset kulmat ovat pohjoisnavan itäpuolella, negatiiviset länsipuolella.



Kuvio 41. Suuntakulma ajettaessa.

Suuntavektoriin ei tässä mittauksessa täysin voida luottaa, sillä sen määrittämiseksi pitää selvittää kaivinkoneen aiheuttama offset-arvo Y-akselilla. Nollakohta pitää laskea samassa pisteessä niin, että lähellä ei ole mitään muita magneettikentän aiheuttajia. Myös suunta pitää ottaa ylös.

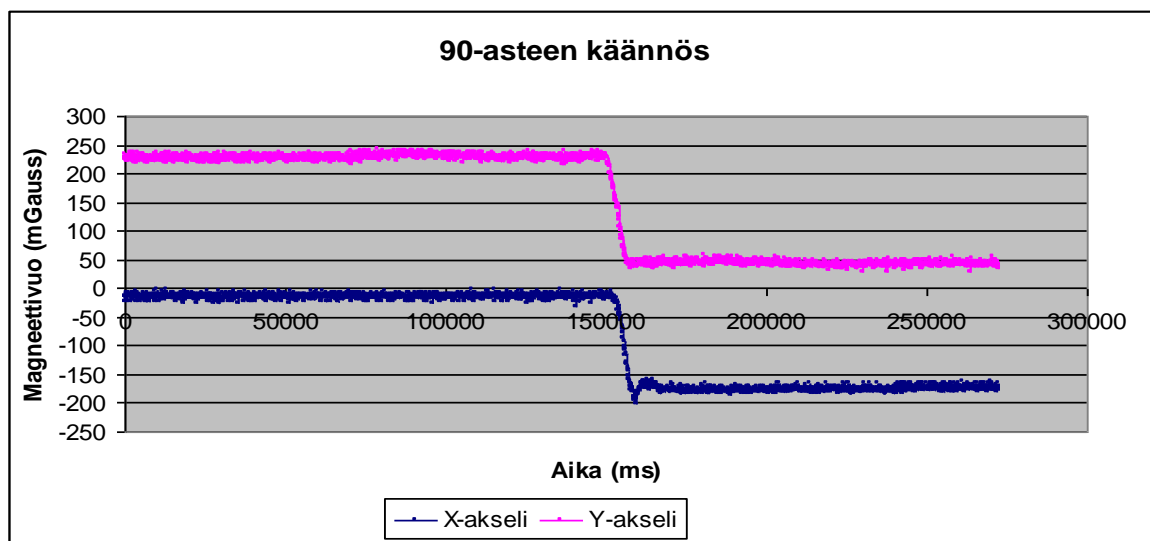
Tämän jälkeen pitää mitata magneettikentän voimakkuus samassa pisteessä samaan suuntaan, kun välissä on kaivinkone.

Offset-arvossa pitää ottaa myös huomioon kaivinkoneen puomin asento, kuten kuviosta 42 nähdään. Käytännössä offset pitäisi laskea jokaiselle puomin asennolle erikseen. Anturifuusio tarjoaa tähän kiertoratkaisun: jos magneettivuon kasvaa johonkin suuntaan, mutta havaittavaa kulmanopeutta ei ole, voidaan olettaa että suunta ei oikeasti muutu vaan itse kaivinkone aiheuttaa muutoksen magneettikenttään.

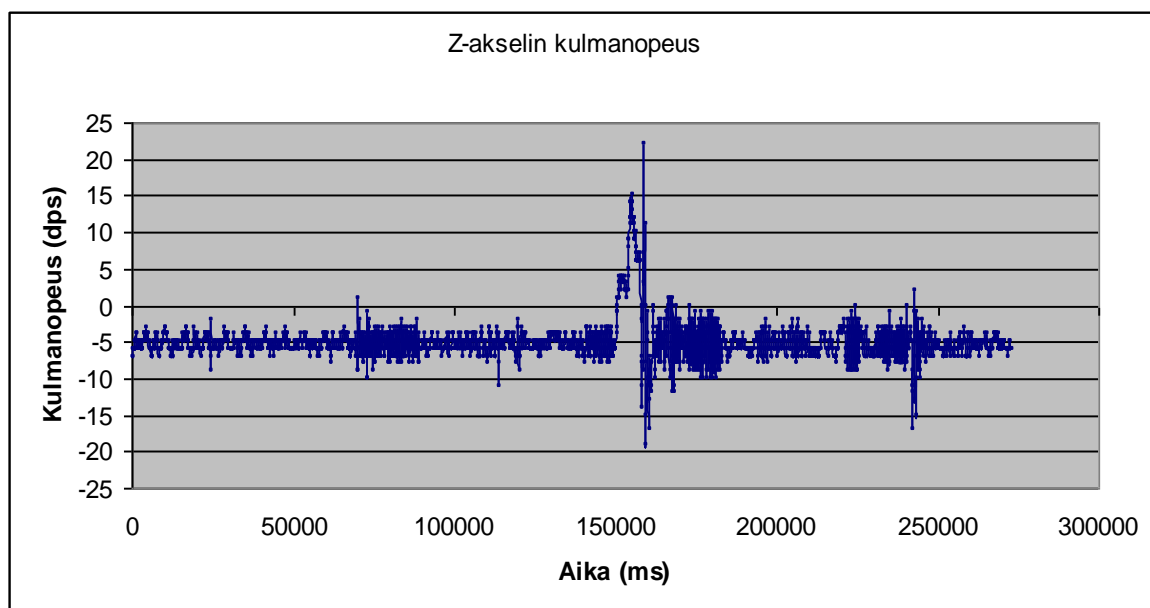
Seuraavaksi mitattiin antureiden käytöstä, kun kaivinkone on paikallaan. Kaivinkonetta käännettiin 90° , liikuteltiin puomia ylös, eteen, alas ja lähemmäs. Konetta käännettiin vielä eri kulmanopeuksilla täysiä 360° asteen kierroksia puomin ollessa eri asennoissa. Työtahti oli tässä vaiheessa vielä rauhallinen, ja kaivurin raskaasta käytöstä saadut mittatulokset tulevat vasta myöhemmin.

Kuviosta 36 nähdään yhä antureiden orientaation kaivurin suhteen.

Ensiksi kaivuria käännettiin 90° -astetta vastapäivään, ja mitattiin magnetometrin X- ja Y-akselin ulostuloja. Mittauksen alkutilaksi arvioitiin pohjoisnavan suunta ja asetettiin X-akseli osoittamaan sinne.



Kuvio 42. Magnetometri 90-astetta.



Kuvio 43. Gyroskoopin Z-akselin kulmanopeus.

Kuvioista 42 nähdään, että magnetometrin arvot muuttuvat täysin identtisesti toisiinsa nähdessä, ja ovat toistensa peilikuvia kuten pitääkin. Tärkeintä on huomata, että vaikka X-akselin arvot lähtivät lähes nollassa, Y-arvo ei 90° -asteen käännöksen jälkeen ole nollassa.

Tämä johtuu puomin aiheuttamasta vääristymästä magneettivuossa. Kuviosta 43 voidaan todeta pyörimisen alku-, ja loppuhetki. Kuvioita vertaamalla voidaan todeta, että molemmat anturit tunnistivat pyörimisen aloitus ja lopetushetken samaan aikaan.

Mittaus suoritettiin kauha mahdollisimman lähellä konetta, jotta kauhan aiheuttama vääristymä olisi mahdollisimman pieni. Y-akselin offset-arvon määrittelemiseksi pitää tutkia kuvioista 42 alku ja lopputilanteen arvoa molemmilla akseleilla. Kuviosta katsottuna X-akseli lepää alkutilassa noin -20 mGauss kohdalla, ja putoaa -175 mGaussiin. Tämä noin 150 mGaussin vaihtelu pitää näkyä samanlaisena myös Y-akselilla, jos ei ole ulkoisia häiriötekijöitä. Y-akselin arvot lähtevät 225 mGaussista, ja laskevat noin 45 mGaussin kohdalle. Kun lasketaan erotukset, voidaan määritellä kuinka paljon Y-akselin arvo näyttää liikaa:

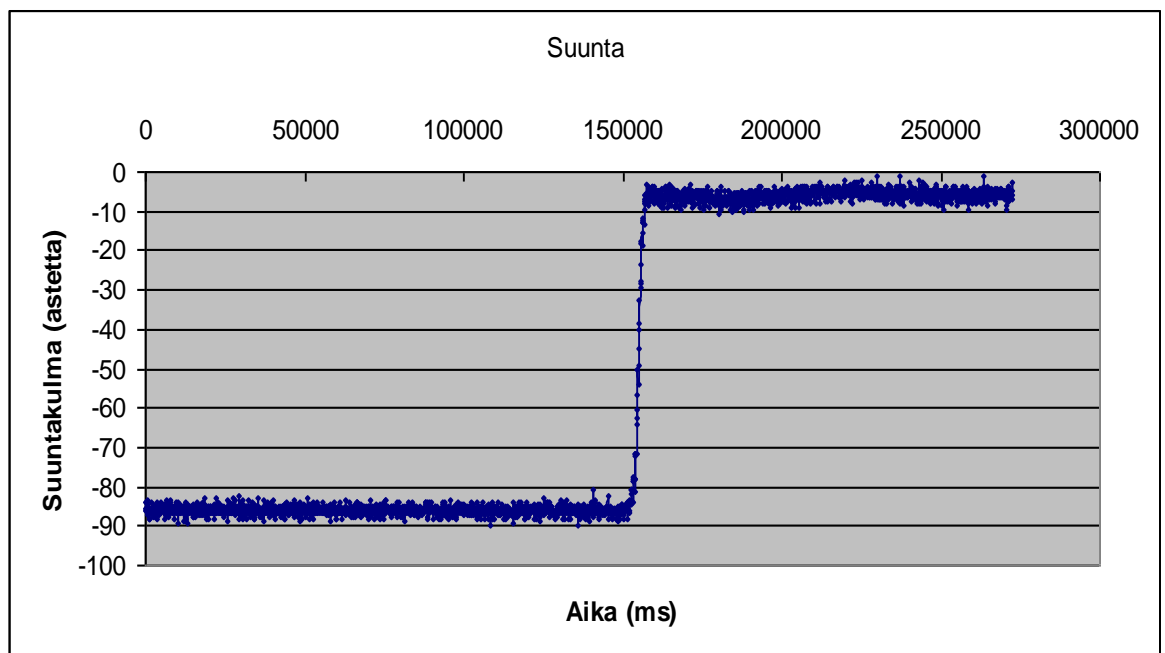
$$X: -20 - (-175) = 155$$

$$Y: 225 - 45 = 180$$

$$\text{Erotus (offset): } 180 - 155 = 25$$

Laskujen perusteella kaivinkoneen puomi ala-asennossa aiheuttaisi noin 25 mGaussin lisän anturin havaitsemaan magneettivuohon Y-akselilla verrattuna X-akseliin.

Tästä mittauksesta voidaan selvittää helposti, kuinka tarkka suunta magnetometristä saadaan, ja oliko mittaajien arvioima pohjoisnavan suunta oikein. Jälleen voidaan olettaa että laite on horisontin suhteen vaakatasossa, joten suunta voidaan laskea kaavalla (11), ottaen puomin aiheuttama offset-arvo huomioon. Suuntakulman mittauksessa ei ole otettu kaivinkoneen aiheuttamaa magneettivuon vääristymään huomioon, sillä maan magneettikenttä kumoaa vääristymää kummallekin akselille yhtä voimakkaasti. Tästä syystä suunnan muutos voidaan mitata ilman kaivinkoneen aiheuttaman vääristymän huomioimista. Pitää kuitenkin muistaa, että suunta ei ole absoluuttinen (pohjoisnavan suhteen) vaan kuvio 44 esittää vain suunnan muutosta kaivinkoneen alkuperäisen orientaation suhteen.



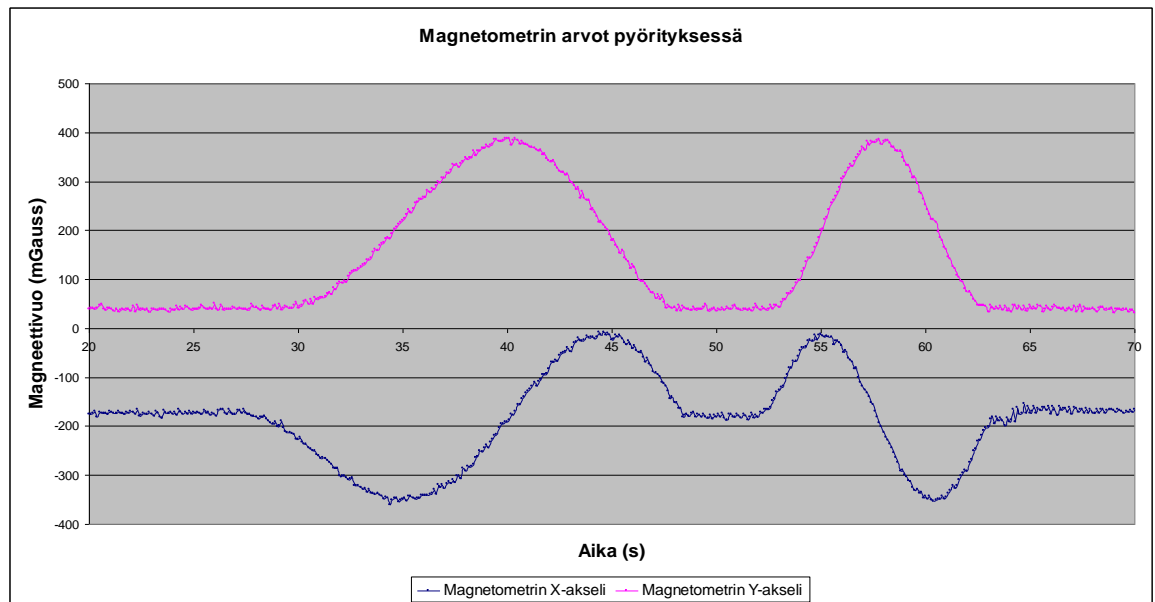
Kuvio 44. Suunnan muutos 90-asteen käännöksessä.

Kuvion 44 tuloksesta nähdään, että laite todellakin tuntee pyörineensä 90-astetta.

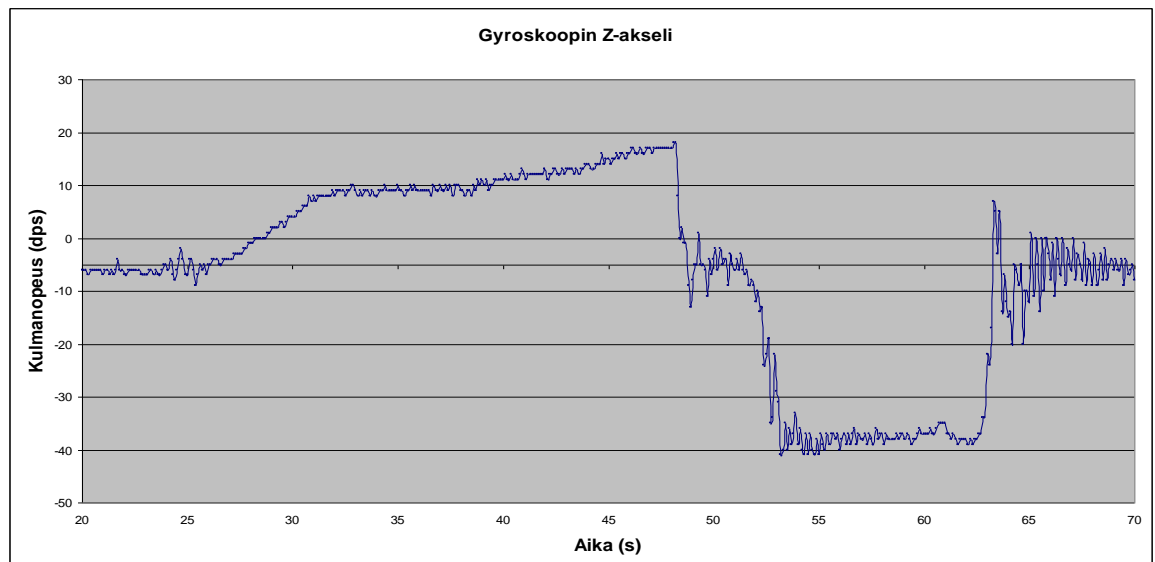
Mittavirhettä aiheuttaa kaivinkoneen operoijan arvioiman 90-asteen käännöksen tarkkuus. Tämä virhelähde huomioon ottaen tulos on kuitenkin hyvä. Suunta on laskettu vähentämällä jokaisesta Y-akselin arvosta tuo puomin aiheuttama 25 mGaussin offset-arvo.

Tärkein huomio tässä mittauksessa on kuitenkin kaivinkoneen aiheuttama merkittävä lisä magneettivuohon. Y-akseli näyttää noin 200 mGauss liikaa, X-akseli 175 mGauss liian vähän. Kun tämä otetaan huomioon, voidaan kaivinkoneen arvioida olleen alunperin kauha (Y-akseli) kohti länttä, ja mittauksen lopussa kohti etelää. X-akseli puolestaan olisi mittauksen alussa kohti pohjoista, ja mittauksen lopussa länttä kohti. Tämä ilmiö johtuu siitä, että vääristynyt magneettikenttä anturin suhteen vahvistuu tai vaimenee suunnan muuttuessa maan magneettikentän suuntaiseksi.

Seuraavaksi laitetta pyöritettiin 360° mitattiin puomin asennon vaikutusta magnetometriin.



Kuvio 45. Magnetometrin arvot puomi alhaalla.

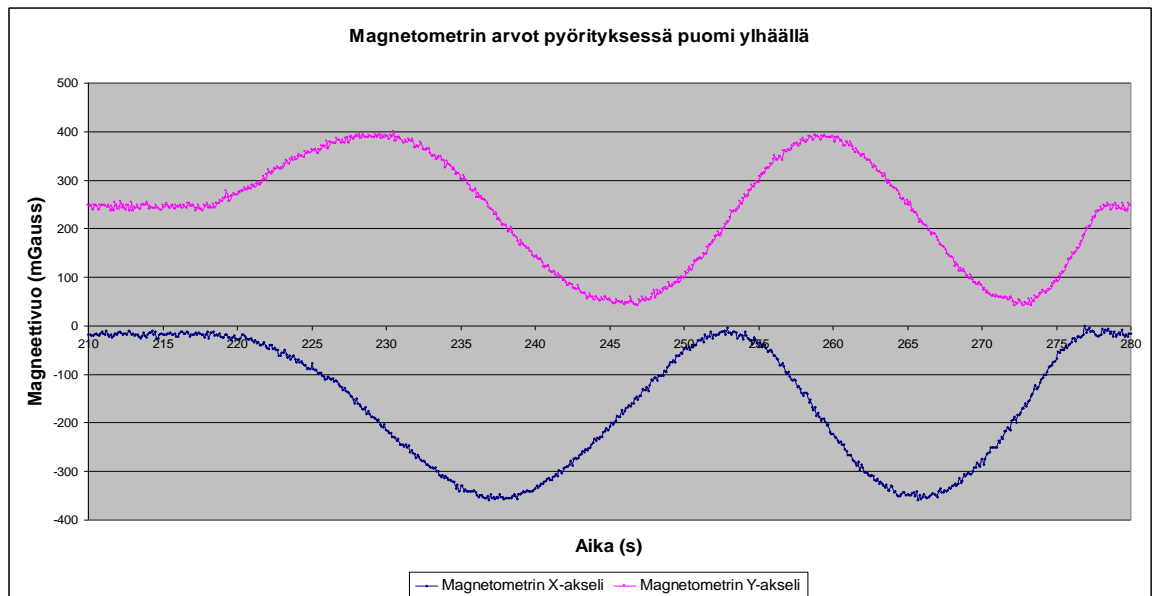


Kuvio 46. Kulmanopeus kuvion 45 mittauksissa.

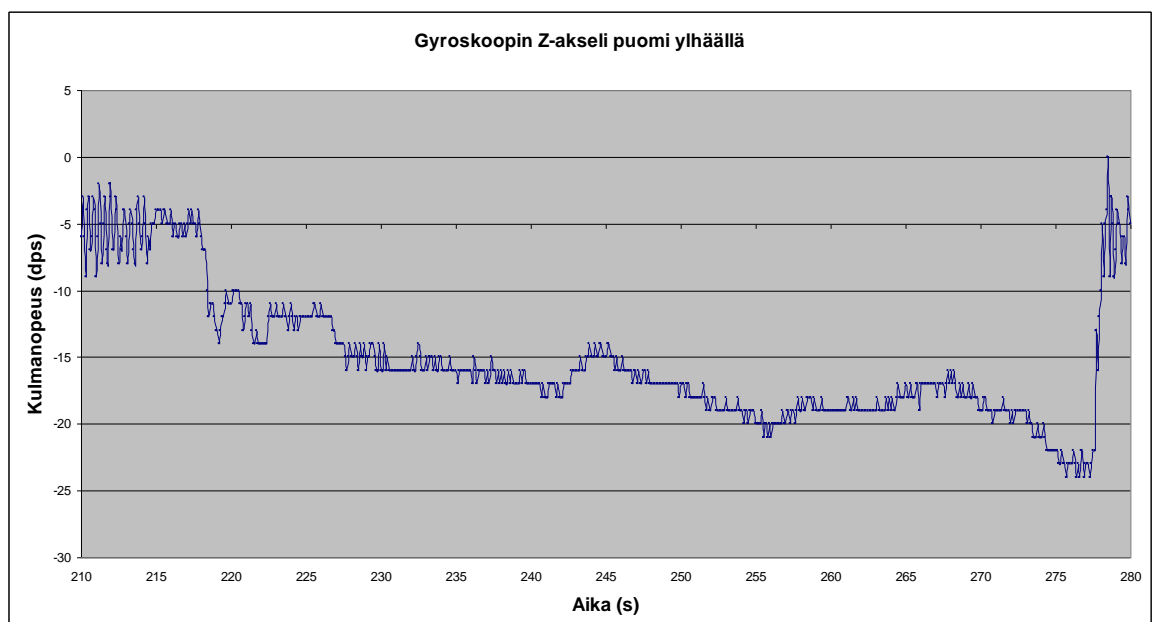
Kuvioissa 45 ja 47 on esitetty puomin asennon vaikutus magnetometrin arvoihin. Kuviossa 45 on esitetty kaksi 360° kierrosta. Mittaukset on tehty puomi alhaalla ja konetta käännettiin 360° ensin vastapäivään, sitten myötäpäivään.

Kuviossa 47 on esitetty sama mittaus puomi ylhäällä, sillä erolla että laitetta pyöritettiin 2 kierrosta myötäpäivään. Puomi on magnetometrin Y-akselin suunnassa, ja sen vaikutus pitäisi näkyä suoraan Y-akselin amplitudin muutoksena. Kuvioista kuitenkin nähdään, että puomin asennolla ei ainakaan näissä mittauksissa ole suurta vaikutusta mittaustulokseen.

Jos käyrien maksimikohtia vertaillaan, nähdään että kuviossa 45 Y-akselin maksimikohta on 387 mGaussin kohdalla, ja kuviossa 47 maksimikohta on 400 mGaussin kohdalla. Tämä tarkoittaa sitä, että puomin asennon muutos lisää maksimissaan 13 mGauss offsetia Y-akselille.



Kuvio 47. Magnetometrin arvot puomi ylhäällä.



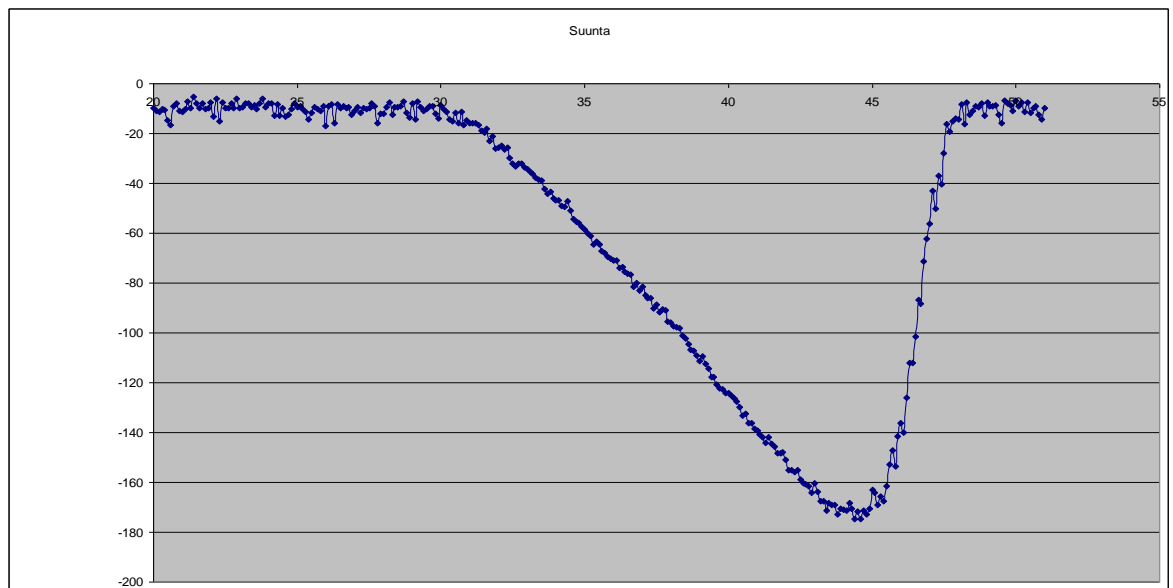
Kuvio 48. Kulmanopeus puomi ylhäällä.

Myös kuvioista 45 ja 47 on havaittavissa huomattava offset-arvo molemmilla akseleilla. Näyttäisi siltä, kuin nollakohta olisi Y-akselilla noin 200 mGauss kuvaajan nollatason yläpuolella. X-akseli puolestaan näyttäisi olevan -175 mGauss kuvaajan nollatason alapuolella. Nämä offset-arvot johtuvat jälleen kaivinkoneen aiheuttamasta vääristymästä magneettikentässä, mutta pyörimisliikkeen tunnistamiseen ne eivät vaikuta, sillä maan magneettikenttä kumoaa/vahvistaa 90-asteen välein vuoroin X- ja Y-akselin offset-arvoa. Vahvistuminen tapahtuu kun akselin positiivinen suunta on pohjoiseen päin, vaimeneminen kun se osoittaa etelään.

Oleellinen havainto edellisistä mittauksista: Pyöriminen voidaan havaita, vaikka magnetometri olisikin vääristyneen magneettikentän alaisuudessa.

Vain jos halutaan absoluuttinen suunta (suunta pohjoisnavan suhteen) pitää vääristykset ottaa huomioon, sillä mittaustuloksen luotettavuuteen vaikuttaa vain ulkopuolisten tekijöiden aiheuttamat muutokset magneettikenttään.

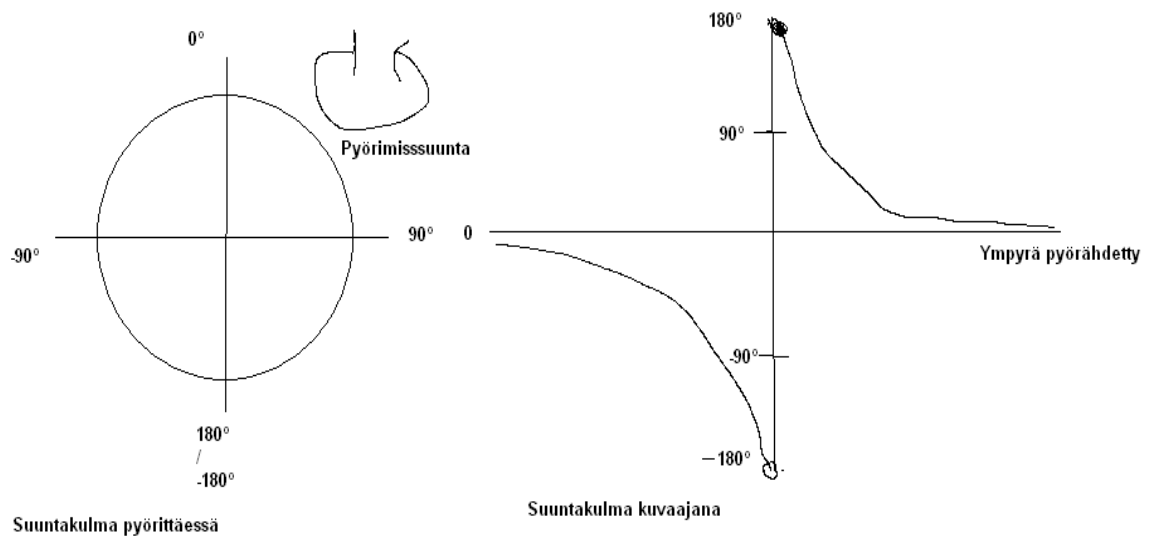
Kuvioista 46 ja 48 voidaan todeta kulmanopeus kummankin mittauksen aikana. Positiivinen kulmanopeus tarkoittaa vastapäivään pyörimistä, ja negatiivinen myötäpäivään pyörimistä. Epätasainen kulmanopeus selittyy sillä, että kaivinkoneen kuljettaja ei voinut arvioida pyörimisnopeutta kovin tarkasti.



Kuvio 49. Suunnan käyttäytyminen 360-asteen käännöksessä

Kuviosta 49 nähdään, miten suuntakulma muuttuu, kun laitetta käännetään 360°. Suuntakulman kuvaajan kulmakerroin riippuu laitteen pyöritysnopeudesta, mikä ei tässä mittauksessa ole täysin vakaa. Suuntakulman nollakohta ei myöskään ole nollassa, mikä johtuu ulkoisen kappaleen aiheuttamista häiriöistä (kaivinkoneesta). Kuviosta 46 nähdään, että laite pyörii vastapäivään (positiivinen kulmanopeus).

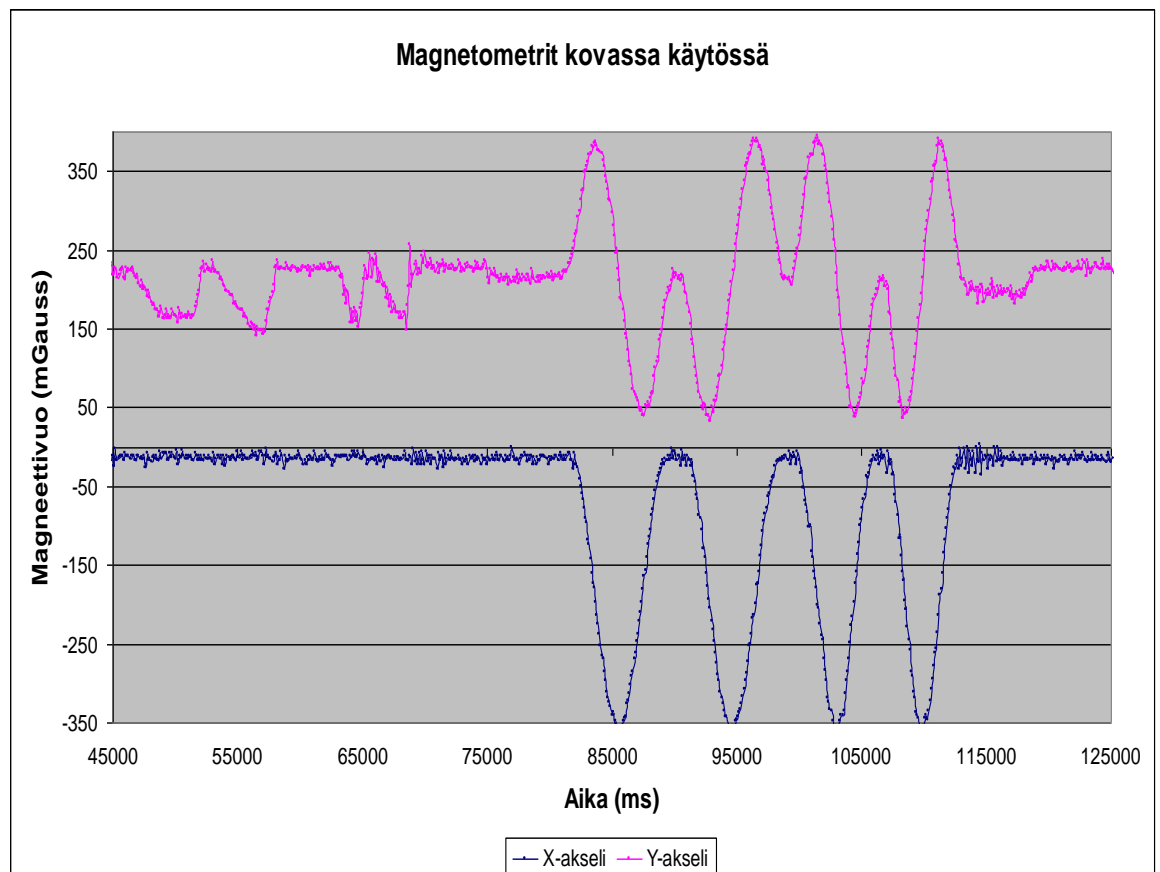
Suuntakulman merkki pitäisi myös viimeisellä puolikkaalla (30s – 45s) virallisesti olla positiivinen ja suuntakulman pitäisi pienentyä kohti 0°. -180° kohdalla pitäisi myös olla epäjatkuvuuskohta 180°, josta lähdettäisiin laskemaan kohti 0°. Taulukkosovellus ymmärtää vain, että lähtöpiste nolasta lähdetään lähestymään minimiarvoa -180°, josta lähdetään takaisin kohti nollakohtaa. Suuntakulmat menisivät oikeasti kuvion 50 osoittamalla tavalla.



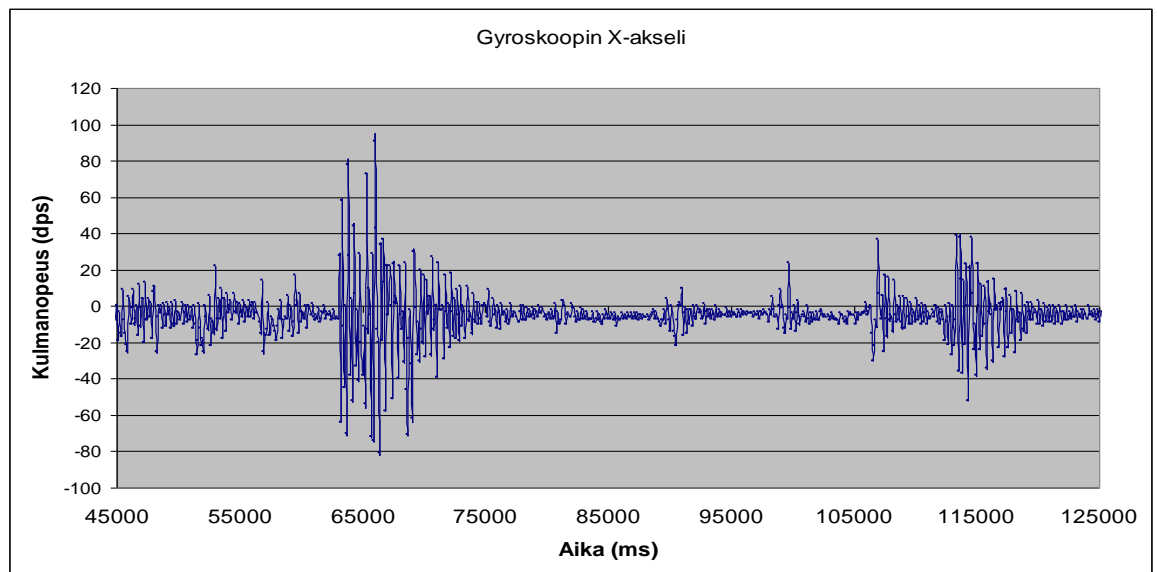
Kuvio 50. Suuntakulma pyörimisliikkeen eri neljänneksillä.

Viimeisessä mittauksessa yritettiin simuloida mahdollisimman vaikeita olosuhteita, eli kaivinkonetta käsiteltiin raskaasti. Testiin kuului koneen heiluttamista, pudottelua, sekä pyörittämistä mahdollisimman nopeasti. Tarkoituksena oli selvittää leikkaako gyroskooppien arvot, kun koneeseen kohdistetaan äkillisiä kulmakiihtyvyyksiä.

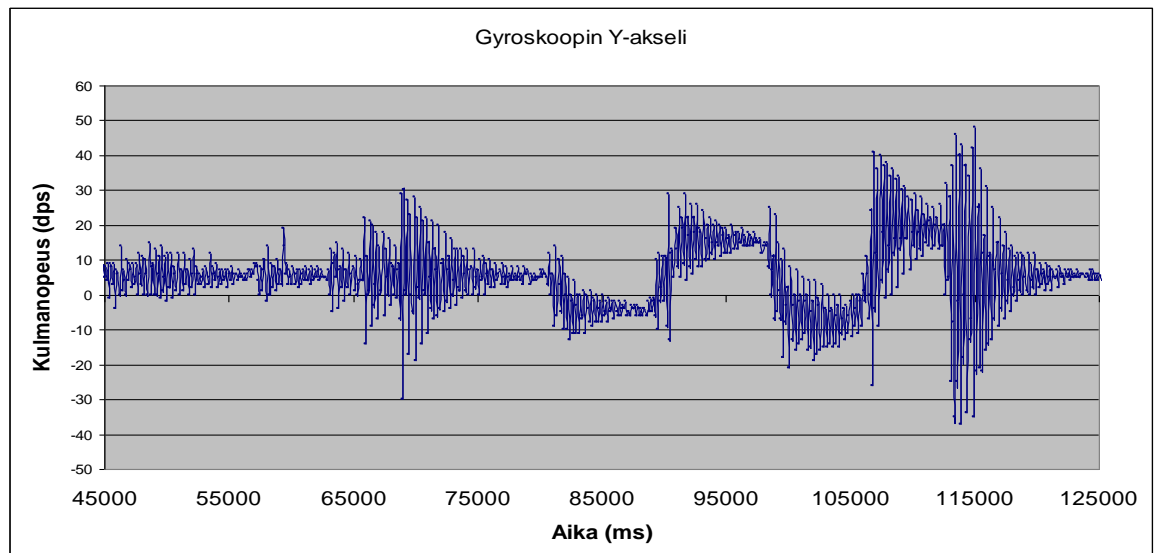
Kuviosta 50 nähdään magnetometrien käyttäytyminen. Kuviosta 51-53 nähdään koneen asennon muutokset kullakin akselilla. Kuvio ei esitä tangenttikulman käyttäytymistä, vaan suunnan käyttäytymistä.



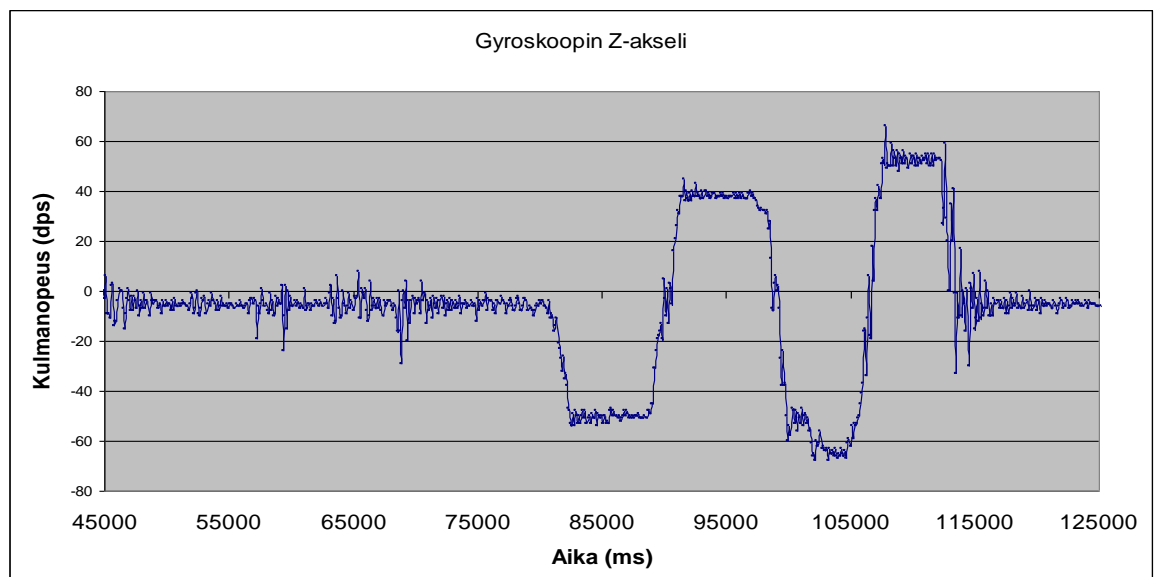
Kuvio 50. Magnetometrit, kun konetta ajettiin rankasti



Kuvio 51. Gyroskoopin X-akseli



Kuvio 52. Gyroskoopin Y-akseli



Kuvio 53. Gyroskoopin Z-akseli

Kuvioista 50 ja 51 aikaväliltä 45000-75000 ms nähdään, mikä vaikutus kaivinkoneen etulevyn asennolla on magnetometrin Y-akseliin ja kuinka X-akselia mittaava gyroskooppi reagoi sen asennon muutoksiin.

Kuviosta 50 nähdään myös, että magnetometrin X-akseliin kaivinkoneen keulan asento ei vaikuta.

Mittauksessa etulevyä painettiin maahan ja kaivinkone nostettiin sen avulla ilmaan, jonka jälkeen levy nostettiin nopeasti ylös niin, että kaivinkoneen nokka putosi maahan äkillisesti. Mittauksen tarkoituksena oli tarkkailla eritoten gyroskoopin X-akselin reaktioita, kun laitteeseen kohdistetaan äkillinen kulmakiikhtyvyys. Nopeudet eivät kuitenkaan missään vaiheessa nousseet anturille liian suuriksi, joten mittausten päätteeksi anturin nollatila oli vielä samassa pisteessä, kuin mittaukset aloitettaessa. Kuviosta 51 nähdään, että akselille kohdistui hetkellisesti erittäin voimakkaita kulmakiikhtyvyyksiä.

Kuviosta 52 nähdään, että myös gyroskoopin Y-akseli reagoi keulan asennon muutokseen. Tämä johtuu luultavasti anturin heikosta tukipisteestä kaivinkoneen takana. Muutos aiheuttaa mittaustulokseen myös paljon kohinaa.

Viimeisenä konetta käännettiin oman akselinsa ympäri mahdollisimman nopeasti, jotta nähtäisiin miten Z-akselia mittaava gyroskooppi reagoi nopeisiin käännöksiin. Kuvioista 50 ja 53 nähdään pyörimissuunta, kulmanopeus sekä magnetometrien arvot nopeassa pyörimisliikkeessä. Jälleen, positiivinen kulmanopeus Z-akselilla tarkoittaa pyörimistä vastapäivään, negatiivinen myötäpäivään.

Kuviosta 53 nähdään, että suurimmat kulmanopeudet eivät ole lähelläkään anturin maksiminopeuksia. Kulmanopeudet vaihtelevat ± 60 %s välillä, kun anturi pystyy tunnistamaan ± 300 %s kulmanopeuksia.

Rankan työsession jälkeen jokainen anturi on vielä samassa nollakohdassa, kuin mittaukset aloitettaessa. Mittausten jälkeen kaivinkone on tyhjäkäynnillä, eli moottori on vielä käynnissä.

6. Yhteenveto

Perinteiset gyroskoopit ja magnetometrit ovat usein kookkaita, ja hintavia laitteita. Uudet MEMS-anturit tarjoavat samat ominaisuudet puristettuna pienelle mikropiirille. Hinta, pieni koko ja mahdollisuus massatuottaa antureita ovat MEMS-tekniikan suurimpia hyötyjä.

Raskas, usein raudasta (teräksestä) valmistettu työkone on haastava ympäristö mille tahansa anturille tai mittalaitteelle. Laitetta käytettäessä antureihin kohdistuu äkillisiä voimia, mikä vaikuttaa suoraan antureiden lukemaan. Moottori käynnistettynä aiheuttaa laitteeseen paljon tärinää ja konetta liikuttaessa jokainen maan pinnanmuoto näkyy mittaustulosten rajuina vaihteluina. Kaikki tämä pitää ottaa huomioon, ja ymmärtää niiden vaikutus gyroskooppiin, ennenkuin anturin tietoja voidaan hyödyntää oikein.

Raskas, metallista valmistettu työkone aiheuttaa ympärilleen myös merkittävän vääristymän maan magneettikentässä, mikä aiheuttaa ennalta-arvaamattomia ongelmia antureita käytettäessä. Herkkä anturi, joka on valmistettu mittaamaan maapallon verrattain heikkoa magneettikenttää, tunnistaa helposti lähellä olevan työkoneen vaikutukset. Myös työmaalla olevat muut metallista valmistetut raskaat esineet pitää ottaa huomioon.

Vaikka olosuhteet ovat vaikeat, ei saatujen tuloksien perusteella ole missään nimessä mahdotonta hyödyntää MEMS-tekniikalla toteutettuja antureita työkoneessa. Vaikka mittaustulosten perusteella pelkät anturit eivät aina ole luotettavia, niiden tietoja yhdistämällä voidaan luoda esimerkiksi luotettava suunnan muutosta mittaava anturipaketti.

Esimerkiksi gyroskoopin ryömintää voidaan kompensoida magnetometrin antamalla suunta-arvolla. Jos suunta ei muutu, voidaan olettaa että laite ei myöskään ole pyörimisliikkeessä.

Taasen jos magnetometrin arvo muuttuu jollakin akselilla äkillisesti, mutta ei ole havaittavaa kulmanopeutta mihinkään suuntaan, voidaan olettaa että laitteen suunta ei muutu, vaan ulkoiset lähteet vaikuttavat magneettikenttään.

Mittauksista selvisi myös mielenkiintoinen ilmiö. Vaikka laite aiheuttaa ylimääräisen komponentin magneettivuohon, suunnan muutokset pystytään silti havaitsemaan kohtalaisen tarkasti magnetometrillä, jos ylimääräinen komponentti ei muutu.

Tämä johtuu siitä, että maan magneettikenttä pyrkii vuoroin kumoamaan ja vahvistamaan laitteen aiheuttamaa vääristymää maan magneettivuossa. Magnetometri tässä tapauksessa näyttää X- ja Y-akseleilla pohjoisnavan suunnan vain $\pm 90^\circ$ väärin.

Tämän tyyppinen anturifuusio on monella tapaa hankala toteuttaa, ja siksi luotettava anturifuusiota ei ole vielä olemassa. Tekniikka kehittyy kuitenkin nopeasti, ja voidaan olettaa, että tulevaisuudessa tällainen mittaustietojen yhdessä hyödyntäminen on arkipäivää.

LÄHTEET

Sähköiset lähteet

1. Wikipedia 2011. [online] [viitattu 21.4.2011] saatavissa:
 - a) <http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
 - b) <http://fi.wikipedia.org/wiki/Pyörimismäärä>
 - c) <http://fi.wikipedia.org/wiki/Coriolis-ilmiö>
 - d) <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hall-ilmiö>
 - e) http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude_and_Heading_Reference_Systems
2. Using LSM3030DLH for a tilt compensated electronic compass. [online][viitattu 21.4.2011] saatavissa: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/17353.pdf>
3. Coriolisvoima. [online] [viitattu 28.4.2011] saatavissa: <http://www.astro.utu.fi/zubi/phys/coriolis.htm>
4. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology | Sensors. [online] [viitattu 28.4.2011] saatavissa: <http://www.sensormag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970>
5. TKT-2540 Paikannuksen menetelmät [online] [viitattu 29.4.2011] saatavissa: <http://www.tkt.cs.tut.fi/kurssit/2540/paikannuspruju.pdf>
6. Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteessa [online] [viitattu 29.4.2011] saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2250.pdf>
7. Kuva [online] [viitattu 29.4.2011] saatavissa: <http://users.skynet.be/spotterfreak/images/attitudeindicatorexamples.gif>
8. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets [online] [viitattu 29.4.2011] saatavissa: <http://www.es.northropgrumman.com/media/whitepapers/assets/hrg.pdf>
9. A STUDY OF PARAMETRIC EXCITATION APPLIED TO A MEMS TUNING FORK GYROSCOPE [online] [viitattu 2.5.2011] saatavissa: <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/4697/research.pdf>
10. MEMS GYROSCOPES AND THEIR APPLICATIONS [online] [viitattu 2.5.2011] saatavissa: <http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf>
11. LPR430AL [online] [viitattu 2.5.2011] saatavissa: <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/16574.pdf>
12. LY330ALH [online] [viitattu 2.5.2011] saatavissa: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/16568/ly330alh.pdf>

13. Design and Analyses of a MEMS Based Resonant Magnetometer [online] [viitattu 3.5.2011] saatavissa: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/9/6951/pdf>
14. Kuva [online] [viitattu 3.5.2011] saatavissa:
<http://accessscience.com/loadBinary.aspx?aID=9678&filename=757446FG0030.gif>
15. Fluxgate Magnetometer [online] [viitattu 3.5.2011] saatavissa:
<http://www.earthsci.unimelb.edu.au/ES304/MODULES/MAG/NOTES/fluxgate.html>
16. Study on Micro Fluxgate Magnetic Sensor [pdf-tiedosto] [viitattu 3.5.2011]
saatavissa: <https://escies.org/GetFile?rsrid=1613>
17. Magnetic Sensors [pdf-tiedosto] [viitattu 3.5.2011] saatavissa:
[http://mems.caltech.edu/courses/EE40 Web Files/Class_Notes_Posted/11_Magnetic Sensors.pdf](http://mems.caltech.edu/courses/EE40/Web%20Files/Class_Notes_Posted/11_Magnetic%20Sensors.pdf)
18. LSM303DLH [online] [viitattu 3.5.2011] saatavissa:
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/16941.pdf>
19. MPU-3000 [online] [viitattu 4.5.2011] saatavissa:
<http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu3000.html>
20. UM0937 [pdf-tiedosto] [viitattu 5.5.2011] saatavissa:
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/USER_MANUAL/CD00271225.pdf
21. OpenPilot [online] [viitattu 5.5.2011] saatavissa:
http://oldwiki.openpilot.org/Main_Page